

**USOS POTENCIALES DE CASCARILLA DE ARROZ EN EL DEPARTAMENTO  
DE CASANARE**

**AUTOR:**

**DAIRO DÍAZ TOVAR**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA**

**ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**YOPAL**

**2019**

**USOS POTENCIALES DE CASCARILLA DE ARROZ EN EL DEPARTAMENTO  
DE CASANARE**

**AUTOR:**

**DAIRO DÍAZ TOVAR**

**Monografía presentada como requisito de trabajo de grado de ingeniero  
ambiental**

**DIRECTORA:**

**Ing. M.Sc. Zulma Lorena Durán Hernández**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA  
ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**YOPAL**

**2019**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Yopal, Casanare ( 29/10/2019)**

## **Dedicatoria**

Este trabajo quiero dedicarlo a mis padres María Isabel Tovar y Guillermo Ernesto Díaz Osorio, gracias a su sacrificio, enseñanzas, esperanza y preciado amor, han hecho de mí el hombre y profesional en que me he convertido. Soy el fruto de su determinación, paciencia y entrega desinteresada, simplemente, verdadero amor. Mi familia: Juliana Díaz Tovar, Jeisson Díaz Tovar, Dana Valeria, Linda Isabella, Ángel David, Heidi y David.

Dedico este trabajo con mucho amor y afecto a la mujer que ha dado un especial sentido a mi vida, aquella persona que cada día llena de felicidad y motivación cada segundo, Lina María Muñoz, gracias por confiar en mí; tu interacción ha sido oportuna, significativa y diferenciadora.

En memoria de Jaiver Guillermo Díaz Tovar y Jaiver Guillermo Díaz Muñoz.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de la vida y de sumergirme en el universo del conocimiento, a mis padres por su amor verdadero, a mis maestros y mi directora de tesis por su apoyo. Lina gracias por tu incuantificable compañía y apoyo.

## CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN .....	15
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	18
2. OBJETIVOS .....	20
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
2.1.1. Objetivos específicos.....	20
3. METODOLOGÍA.....	21
3.1. BASES DE DATOS REVISADAS.....	22
3.2. PALABRAS CLAVE .....	22
3.2.1. Español.....	22
3.2.2. Inglés.....	23
3.3. Criterios de selección .....	23
3.4. Captura de información .....	23
4. GENERALIDADES DE LA CASCARILLA DE ARROZ .....	25
4.1. DESCRIPCIÓN.....	25
4.2. BREVE RESEÑA HISTÓRICA .....	26
4.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LA CASCARILLA.....	27
5. APLICACIONES .....	30
5.1. TRANSFORMACIONES FÍSICAS.....	30
5.1.1. Aglomerados .....	30
5.1.2. Mezclas .....	35
5.1.3. Compostaje y fertilizantes.....	36
5.1.4. Lechos y biofiltros.....	37
5.2. TRANSFORMACIÓN QUÍMICA .....	42
5.2.1. Biomasa.....	42
5.2.2. Síntesis de biomateriales .....	52

5.2.3.	Pretratamientos y catálisis en cascarilla de arroz para la síntesis de sílice amorfa nanoparticulada .....	54
6.	ASPECTOS AMBIENTALES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ .....	61
7.	APLICACIONES AMBIENTALES .....	68
8.	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL DEPARTAMENTO DE CASANARE .....	71
9.	CONCLUSIONES .....	74
10.	REFERENCIAS .....	75

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Indicadores de producción periodo 2015-2018. ....	19
Tabla 2. Ficha de captura de referencias.....	24
Tabla 3. Composición termoquímica de la cascarilla de arroz. ....	28
Tabla 4. Comparación entre tipos de pirólisis. ....	44
Tabla 5. Resultados de pirólisis de diferentes tipos de biomasa. ....	45
Tabla 6. Composición química de bioaceite obtenido por pirólisis.....	46
Tabla 7. Lixiviación de especies iónicas en cascarilla. ....	57
Tabla 8. Efecto de impregnación con óxidos metálicos en combustión de cascarilla y paja de arroz. ....	59
Tabla 9. Producción de gases efecto invernadero por cada fuente de biomasa....	64
Tabla 10. Comparación de eficiencia en combustión y gasificación de cascarilla.	65
Tabla 11. Emisión en diferentes tecnologías de lecho fluidizado.....	66
Tabla 12. Huella ambiental de la cascarilla.....	67
Tabla 13. Proyección de personal en una hipotética planta de cascarilla.....	72
Tabla 14. Balance de flujo de caja para una central termoeléctrica de cascarilla. .	73



## LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Evolución de la producción en el periodo 2000-2018.....	18
Gráfica 2. Eficiencia en combustión de cascarilla. ....	47
Gráfica 3. Eficiencia en gasificación de cascarilla.....	49

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema metodológico. ....	21
Figura 2. Representación gráfica de la planta de arroz. ....	25
Figura 3. Representación gráfica del grano de arroz paddy. ....	26
Figura 4. Estructura química de azúcares en cascarilla.....	29
Figura 5. Esquema general de los usos de cascarilla de arroz.....	30
Figura 6. Tipo de interacciones en el briquetado. ....	31
Figura 7. Mecanismos principales de interacción. ....	32
Figura 8. Estructura química de resinas de tipo poliéster. ....	34
Figura 9. Reacción química entre diisocianato de tolueno y etilenglicol. ....	34
Figura 10. Comparación de propiedades mecánicas de diferentes materiales aglomerados. ....	35
Figura 11. Dispositivo piloto de sistema de tratamiento de agua residual. ....	38
Figura 12. Dispositivo de tratamiento de agua residual con biofiltros de cascarilla. .....	39
Figura 13. Humedal artificial con lecho de cascarilla. ....	41
Figura 14. Comportamiento histórico del consumo energético por el hombre. ....	42
Figura 15. Balance de la conversión biológica de la energía solar a biomasa.....	43
Figura 16. Esquema de conversión térmica de biomasa a través de pirólisis.....	45
Figura 17. Esquema de un dispositivo de gasificación. ....	48
Figura 18. Planta piloto de gasificación en la Universidad Nacional de Colombia.	49

Figura 19. Tipos de silanoles superficiales en sílica. ....	54
Figura 20. Pretratamiento en cascarilla para la síntesis de materiales avanzados. .....	56
Figura 21. Diagrama de fase de la sílice.....	62
Figura 22. Conversión de cascarilla por tratamiento térmico. ....	64

## GLOSARIO

**Biochar:** Traducida al español significa biocarbón, es el producto de la descomposición térmica de la materia orgánica rica en carbono.

**Bioaceite:** Se refiere al aceite producido del tratamiento termoquímico de la biomasa.

**Celulosa:** Homopolímero de la glucosa. Constituye la pared celular en lo vegetales, es la unión repetitiva de  $\beta$ -D-glucopiranosas unidas por enlaces  $\beta$ 1-4.

**Catalizador:** Toda sustancia que tiene la capacidad de aumentar la velocidad de las reacciones químicas, al final de la reacción debe obtenerse sin modificación química.

**Combustión:** Reacción química de descomposición de la materia orgánica en presencia de oxígeno para producir dióxido de carbono y agua.

**Endergónico:** Todo proceso que requiere energía para llevarse a cabo.

**Exergónico:** Proceso que libera energía.

**Gas pobre:** Se refiere al gas producido en una descomposición termoquímica con bajo poder calorífico, rico en monóxido de carbono, hidrógeno, compuestos orgánicos de bajo peso molecular y otros gases.

**Gasificación:** Proceso termoquímico en deficiencia de oxígeno que genera syngas.

**Hemicelulosa:** polímero de glucosa, es un heteropolisacárido compuesto principalmente por xilosa, arabinosa, galactosa y manosa.

**Lignina:** Es un polímero de origen natural, compuesto por unidades químicas conocidas como fenoles.

**Pirólisis:** Proceso termoquímico donde la biomasa es transformada en gases no condensables, bioaceite y biocarbón.

**Subproducto (Byproduct):** Se refiere a los productos de las cadenas productivas agroindustriales.

**Syngas:** Gas sintetizado térmicamente de bajo poder calorífico.

**Zeolita:** Es un aluminosilicato cristalino, compuesto de óxidos de silicio, aluminio y metales alcalinos y alcalinos térreos.

## RESUMEN

Se determinó el estado de arte de las transformaciones y usos dados a la cascarilla de arroz a nivel, departamental, nacional e internacional. Mediante una metodología sistemática y objetiva se revisaron las bases de datos científicas y académicas, definiendo criterios de búsqueda y de selección. Las transformaciones pueden ser de tipo físico y químico. Se destacan usos como lecho de secado, fitorremediación, compostaje, aglomeración, entre otros. Puede obtenerse energía de manera directa en operaciones de combustión, producción de syngas en gasificación y biocombustible en pirolisis. A nivel bioquímico se usan tratamiento con micetozoa, a saber: *pleurotus ostreatus*, *cyathus* y *fusarium oxysporum*. También con lombriz californiana puede transformarse productivamente la cascarilla. En procesos de fermentación para obtener biocombustibles es necesario pretratamientos como: extracción con solventes, explosión de vapor, extracción con agua sub-crítica, enzimas celulasa, digestión ácida y alcalina, entre otros. Es importante resaltar el gran interés que ha recibido la producción de derivados de la sílice a partir de cascarilla, en la síntesis de materiales avanzados. Los usos productivos de la cascarilla son diversos y las investigaciones sobre estos son notables, especialmente en universidades e institutos de investigación de los países con mayor producción, India, China, Malasia y Brasil. Se encontró que la mejor alternativa de transformación para el Departamento de Casanare es la combustión por lecho fluidizado en TORBED ®. Es necesario fortalecer procesos de investigación el país y la región en torno a la transformación de la biomasa.

## ABSTRACT

The state of art of the transformations and uses given to the rice husk at the departmental, national and international level were determined. Through a systematic and objective methodology, the scientific and academic databases were reviewed, defining search and selection criteria. The transformations can be physical and chemical. Uses like a drying bed, phytoremediation, composting, agglomeration, among others were considered. Energy can be obtained directly in combustion operations, synthesis gas production and biofuel in pyrolysis. At the biochemical level, treatment with macromycetes, such as: *pleurotus ostreatus*, *cyathus* and *fusarium oxysporum* were used. Also, with Californian earthworm the husk can be productively transformed. In fermentation processes to obtain biofuels, pretreatments such as solvent extraction, steam explosion, extraction with sub-critical water, cellulase enzymes, acid and alkaline digestion, among others, are necessary. It is important to highlight the great interest that the production of silica derivatives from husks has received in the synthesis of advanced materials. The productive uses of the husk are diverse and the investigations on these are remarkable, especially in universities and research institutes of the countries with greater production like India, China, Malaysia and Brazil. It was found that the best transformation alternative for the Department of Casanare is fluidized bed combustion in TORBED®. It is necessary to strengthen the research processes of the country and the region around the transformation of biomass.

## INTRODUCCIÓN

El siguiente documento muestra la revisión bibliográfica de los usos tecnológicos y algunas transformaciones de cascarilla de arroz con fines productivos. Se abordan las diferentes transformaciones a nivel físico y químico, pasando desde aplicaciones de tipo artesanal como usos para lechos de animales, mezclado y compostaje, hasta centrales termoeléctricas de gasificación y pirolisis.

Aproximadamente el 20% del arroz paddy es cascarilla, de esta cascarilla cruda el 20% es ceniza inorgánica compuesta en un 96% de óxido de sílice, un mineral de gran interés tecnológico en el área de materiales. Precisamente la composición química de la cascarilla y sus propiedades físicas, son las que han atraído la atención de varios investigadores, que buscan aprovechar de manera sostenible este importante subproducto agroindustrial. Por otro lado, el contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa lo convierte en una fuente de energía, aprovechable de manera bioquímica y térmica.

Una de las propiedades importantes de la cascarilla es su lenta biodegradación gracias al elevado contenido de lignina y sustancias inorgánicas, es un hecho que durante mucho tiempo planteo una dificultad a la hora de darle disposición final a la cascarilla. Gracias al desarrollo técnico moderno puede aprovecharse como material aislante y aglomerados para paneles.

La gran generación de cascarilla de arroz en el departamento de Casanare, aunado a la baja transferencia tecnológica de la academia al sector agrícola, generan una oportunidad de investigación y desarrollo, que permita unir esfuerzos para reducir la huella ambiental de una las principales actividades productivas del departamento, generando valor agregado y desarrollo sostenible. Esta monografía ofrece un estado del arte a los estudiantes, investigadores y comunidad en general, para apoyar los procesos de investigación aplicada.

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La cadena productiva de arroz en Colombia genera aproximadamente un 20% del arroz paddy en cascarilla, es decir, cerca de 0,596 millones de toneladas al año; actualmente el departamento de Casanare tiene la mayor producción nacional, creando en promedio 167.493 toneladas de cascarilla por año, durante los últimos tres años (DANE & FEDEARROZ, 2017a, 2017b, 2018c, 2018b, 2018a). A pesar de que el departamento es líder en producción, son pocos los proyectos y procesos de transformación, investigación e innovación relacionados con usos de los subproductos de la cadena productiva del arroz.

La incorrecta gestión de este importante residuo sólido agroindustrial, da lugar a que se deposite en botaderos a campo abierto, donde gracias a procesos de biodegradación anaeróbica genera metano (Gadde, Bonnet, Menke, & Garivait, 2009, p. 1), con un potencial de gas de efecto invernadero a 20 años de 62 veces con respecto al dióxido de carbono (Maslin, 2008). Por otro lado, el recurso suelo también se ve fuertemente afectado, modificando la dinámica de nutrientes, microbiota, radiación solar, flujo de gases y agua (Doménech, 2000). Adicionalmente, depositar la cascarilla a campo abierto promueve la propagación de vectores y la afectación de especies nativas.

Quemar a campo abierto la cascarilla emite gases efecto invernadero como: CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>, que a su vez participan en el fenómeno de lluvia ácida (Chiang, Liao, & Lu, 2016; Guan, Chen, Cheng, Yan, & Hou, 2017). De otra manera, la ceniza producto de la combustión a elevadas temperaturas es potencialmente peligrosa para la salud, ya que está constituida por sílice de tamaño de partícula ultrafino, que al ser respirado puede tener efectos carcinogénicos y de bioacumulación, generando silicosis, fatiga, pérdida del apetito y fallas respiratorias (Mor, Manchanda, Kansal, & Ravindra, 2017; Pode, 2016), es bien sabido que la ceniza generada en los molinos o biochar se usa ampliamente como fertilizante. Es necesario darle un tratamiento a la cascarilla bajo principios de producción más limpia (Escaño, Federico, Rivero, Barrett, & Merchand, 2011; Restrepo Gallego, 2006; van Hoof & Herrera, 2007), para reducir su huella ambiental.

La cadena productiva de arroz representa el 79% del total de las actividades agrícolas del departamento (Colciencias & Gobernación del Casanare, 2012, p. 46), destacándose como la actividad agroindustrial principal en Casanare. En virtud de lo anterior, el PEDCTI propone el programa de fortalecimiento del sector arrocero a partir de CTel, cuarto eje temático (*“Sistemas de Producción limpia, Utilización de Energías Alternativas a través del uso de biomasa residual, Desarrollo de usos Cosméticos, Desarrollo de usos para la confitería, Desarrollo de Aditivos Industriales, Desarrollo de Alimentos funcionales y de calidad alimenticia”*) (Colciencias & Gobernación del Casanare, 2012, p. 235), como medida de



aprovechamiento de los subproductos y residuos agroindustriales. También el PAED departamental prioriza la idea de proyecto titulada *“Aprovechamiento de la cascarilla de arroz para obtención de materiales avanzados y sustancias químicas aprovechables y recursos energéticos”* (Colciencias & Gobernación del Casanare, 2015, p. 5) con el objetivo de aprovechar las oportunidades y fortalezas de tan importante actividad agrícola, incorporando aspectos claves como: la producción más limpia, ecoeficiencia, reducción de la huella ambiental e incremento de la rentabilidad.

La necesidad de realizar investigación en torno a los subproductos y residuos agropecuarios es evidente a nivel nacional. Específicamente la cascarilla de arroz para el caso del departamento de Casanare, como una oportunidad que involucra producción más limpia y la gestión estratégica de los aspectos ambientales de las actividades agroindustriales. También destacando las implicaciones sociales y económicas que esta situación propicia al generar molestia, inconformidad y deterioro de la salud, de los pobladores vecino a la zona de influencia arroceras.

Considerando lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación:

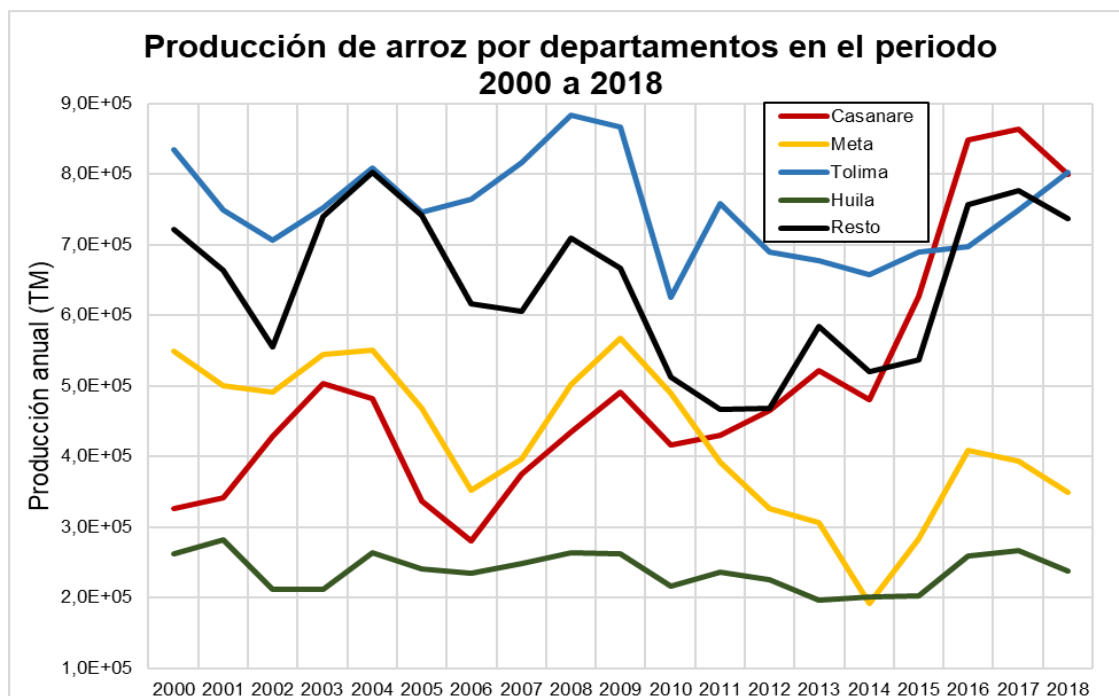
¿De qué maneras puede transformarse y aprovecharse la cascarilla de arroz, en aras de promover procesos de investigación que permitan generar conocimiento y uso sostenible de la cascarilla en el departamento de Casanare?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo a la FAO en el mundo se cultivan 759 millones de toneladas por año de arroz (FAO, 2018); India y China son los países con mayor producción, teniendo una participación a nivel mundial de 33% y 22% respectivamente (Soltani, Bahrami, Pech-Canul, & González, 2015). En América del sur el mayor productor de arroz es Brasil con 12,1 millones TM/año (Avalos-Mezones & Torres-Bazán, 2018; Muthayya, Sugimoto, Montgomery, & Maberly, 2014), en segundo lugar, se encuentra Perú con una producción de 3,14 millones de TM/año (Retto Hernández, 2019, p. 20), seguido por Colombia con 2,98 millones de TM/ año (DANE & FEDEARROZ, 2018c).

Desde el año 2016 a la fecha el promedio de producción anual en el departamento de Casanare fue 837.464 TM de arroz paddy que corresponde a un 28,1% de la producción total anual en Colombia (DANE & FEDEARROZ, 2017c, 2018b, 2018c). El departamento de Casanare ha mantenido un crecimiento progresivo de su producción, hasta el punto de que, en 2016, 2017 y 2018 superó al departamento del Tolima. La evolución de la producción de arroz desde el año 2000 hasta el 2018, se muestra en la Gráfica 1. Evolución de la producción en el periodo 2000-2018.

Gráfica 1. Evolución de la producción en el periodo 2000-2018.



**Fuente:** Elaboración propia a partir de los censos arroceros (DANE & FEDEARROZ, 2017c, 2018b, 2018c)

Como muchos subproductos agroindustriales desaprovechados, la cascarilla de arroz podría ser valorizada de manera sostenible y rentable. Teniendo en cuenta, que aproximadamente el 20% de cascarilla es sílice amorfa (Soltani et al., 2015), con un tratamiento apropiado, se puede sintetizar con las mismas características a la sílice precipitada; el precio en el mercado internacional de esta última, es de aproximadamente 800 USD/TM, bajo este supuesto puede hallarse un precio de venta de la ceniza transformada a precio de sílice precipitada. Por otro lado, considerando que una tonelada de cascarilla posee un poder calorífico inferior de 15.075 MJ y que una tonelada equivalente de petróleo corresponde a 42.868 MJ (Hernández, 2010), se determina la cantidad de barriles de crudo que se necesitan para cubrir la energía que puede producir la cascarilla generada anualmente. El barril de petróleo WTI a la fecha de 61,84 USD, de esta manera se calcula el precio energético en términos de TEP. Con los supuestos antes mencionados se presenta la Tabla 1. Indicadores de producción periodo 2015-2018.

Tabla 1. Indicadores de producción periodo 2015-2018.

ITEM/AÑO	2015	2016	2017	2018
Producción de arrocería en Casanare (TM)	626.930	849.007	863.376	800.010
Cascarilla Casanare (TM)	125.386	169.801	172.675	160.002
Ceniza Casanare (TM)	25.077	25.077	25.077	25.077
Toneladas equivalentes de petróleo (TEP)	43.874	59.415	60.421	55.987
BARRILES WTI	333.660	451.852	459.500	425.776
Precio de ceniza, Sílice precipitada (Dólares)	2,01E+07	2,72E+07	2,76E+07	2,56E+07
Precio barril WTI (Dólares)	6,49E+10	8,79E+10	8,94E+10	8,29E+10
Total (Dólares)	4,07E+07	5,51E+07	5,60E+07	5,19E+07
Total (Pesos)	1,32E+11	1,78E+11	1,81E+11	1,68E+11
Total (Billones de Pesos)	0,13	0,18	0,18	0,17

**Fuente:** elaboración propia a partir de los censos arroceros (DANE & FEDEARROZ, 2017c, 2018b, 2018c)

Es claro que la producción corresponde al departamento de Casanare, indicando que para los últimos cuatro años se hubiera podido producir 0,66 billones de pesos. Todos los cálculos están cimentados en un escenario productivo optimista, sin embargo, aún si el margen se redujera a un 20% no dejaría de ser una cifra importante para un subproducto agropecuario, que en el presente no es aprovechado.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Sintetizar el estado del arte de las transformaciones tecnológicas y productivas de la cascarilla de arroz, priorizando aquellas que implican aplicaciones de catálisis, obtención de energía y sostenibilidad ambiental.

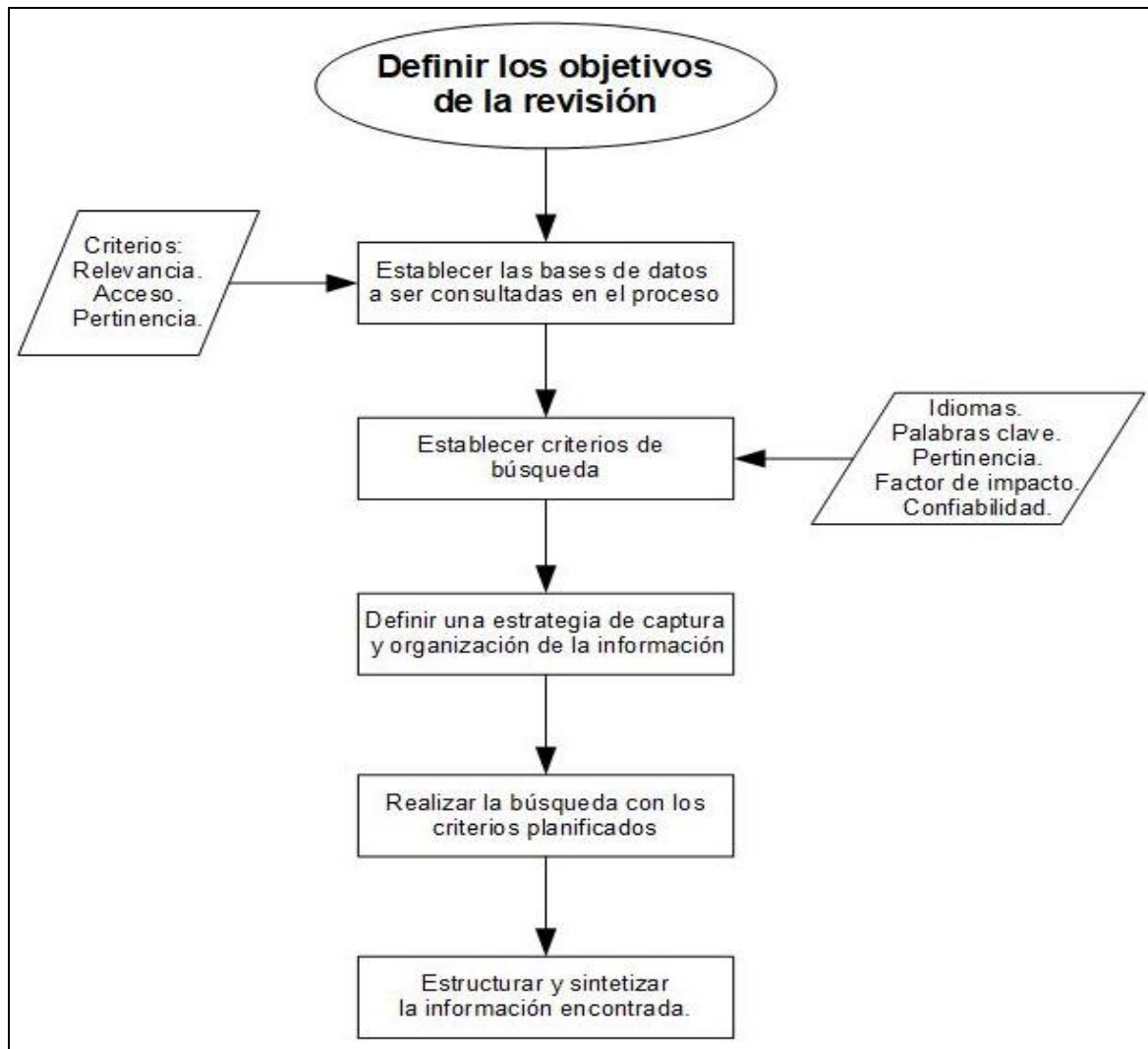
#### **2.1.1. Objetivos específicos**

1. Definir las bases de datos que serán consultadas durante el proceso de revisión bibliográfica y establecer criterios de búsqueda que orienten un proceso objetivo y sistemático.
2. Diagnosticar mediante consulta bibliográfica la producción de cascarilla de arroz en el departamento de Casanare.
3. Identificar aspectos relevantes entorno a las transformaciones tecnológicas y productivas de la cascarilla de arroz a nivel internacional, nacional, regional y departamental.
4. Identificar una alternativa de transformación sostenible apropiada para el Departamento de Casanare.

### 3. METODOLOGÍA

El presente trabajo de monografía es de tipo investigación documental de bases de datos, de tipo cualitativo basado en un enfoque inductivo. Para realizar una búsqueda sistemática y objetiva se estableció el procedimiento mostrado en la siguiente figura.

Figura 1. Esquema metodológico.



**Fuente:** Elaboración propia a partir de (Cué Brugueras, Díaz Alonso, Díaz Martínez, & Valdés Abreu, 2008; Guirao-Goris, Olmedo Salas, & Ferrer Ferrandis, 2008; Merino-Trujillo, 2011).

### 3.1. BASES DE DATOS REVISADAS

Las bases de datos que se escogieron para ser consultadas son:

- i. Google académico (<http://scholar.google.es>).
- ii. Motor de búsqueda de la biblioteca de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (<https://stadium.unad.edu.co/>).
- iii. Scielo (<http://www.scielo.cl/>).
- iv. Doaj, directory of open Access journals (<https://doaj.org/>);
- v. Latindex, (<http://www.latindex.org/latindex/inicio>);
- vi. Dialnet (<http://dialnet.unirioja.es>);
- vii. Highwire universidad de Stanford (<http://highwire.stanford.edu/lists/freeart.dtl>);
- viii. Biomed central (<https://www.biomedcentral.com/journals>);
- ix. Highbeam research (<https://www.highbeam.com/>);
- x. Science research (<http://www.scienceresearch.com/scienceresearch>).
- xi. Intelligo-repositorios (<http://repos.explora-intelligo.info>).
- xii. Redalyc (<http://www.redalyc.org>).
- xiii. Microsoft academic search (<https://academic.microsoft.com/>).
- xiv. ERIC (<http://eric.ed.gov/>).
- xv. Worldwide science (<http://worldwidescience.org/>).
- xvi. Refseek (<https://www.refseek.com/>).
- xvii. LRC virtual (<http://www.virtuallrc.com/>).
- xviii. JURN ( <http://www.jurn.org/#gsc.tab=0>).
- xix. BASE (<https://www.base-search.net/>).
- xx. Springer (<https://link.springer.com/> ).
- xxi. EBSCO

### 3.2. PALABRAS CLAVE

Para la presente revisión documental la búsqueda se realizó en los idiomas inglés y español, con las siguientes palabras claves:

#### 3.2.1. Español

- a) Cascarilla de arroz
- b) Usos de cascarilla de arroz
- c) Aplicaciones de cascarilla de arroz
- d) Ceniza de cascarilla de arroz
- e) Usos de ceniza de cascarilla de arroz
- f) Producción de arroz en Colombia
- g) Producción de arroz en Casanare
- h) Catálisis y cascarilla de arroz

- i) Cascarilla de arroz y energía
- j) Medio ambiente y cascarilla de arroz

### **3.2.2. Inglés**

- a) Rice husk
- b) Uses of rice husk
- c) Application of rice husk
- d) Rice husk ash
- e) Uses of rice husk ash
- f) Application of rice husk ash
- g) Rice production in Colombia
- h) Rice production in Casanare
- i) Catalisys and rice husk
- j) Energy and rice husk
- k) Rice husk and environmental

### **3.3. Criterios de selección**

Los criterios de selección de los documentos para ser incluidos dentro de la presente investigación documental fueron:

1. Documentos sujetos a revisión de pares académicos, tesis de grado, monografías de grado, artículos científicos publicados en revistas indexadas, libros, informes oficiales, etc.
2. Pertinencia, corresponde a aquellos documentos que de manera explícita tratan del tema de investigación planteado en la pregunta de investigación de la presente monografía.
3. Acceso, los documentos que puedan ser revisadas en las bases de datos, ya sean de acceso libre y aquellos donde el derecho de usuario por ser estudiante y exalumno de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y la Universidad Nacional de Colombia, respectivamente.

### **3.4. Captura de información**

Dentro de la estrategia de captura de información se ha preparado una hoja de cálculo de Excel para registrar las bases de datos consultadas. La cual se presenta Tabla 2. Ficha de captura de referencias.

Tabla 2. Ficha de captura de referencias.

Fecha	Base de datos	Palabra de búsqueda	No. de resultados	Journal	Factor impacto	Tipo	Título artículo	Autores	Año	Objetivos	Método de análisis	Resultados	Ideas clave	DOI

**Fuente:** Elaboración propia

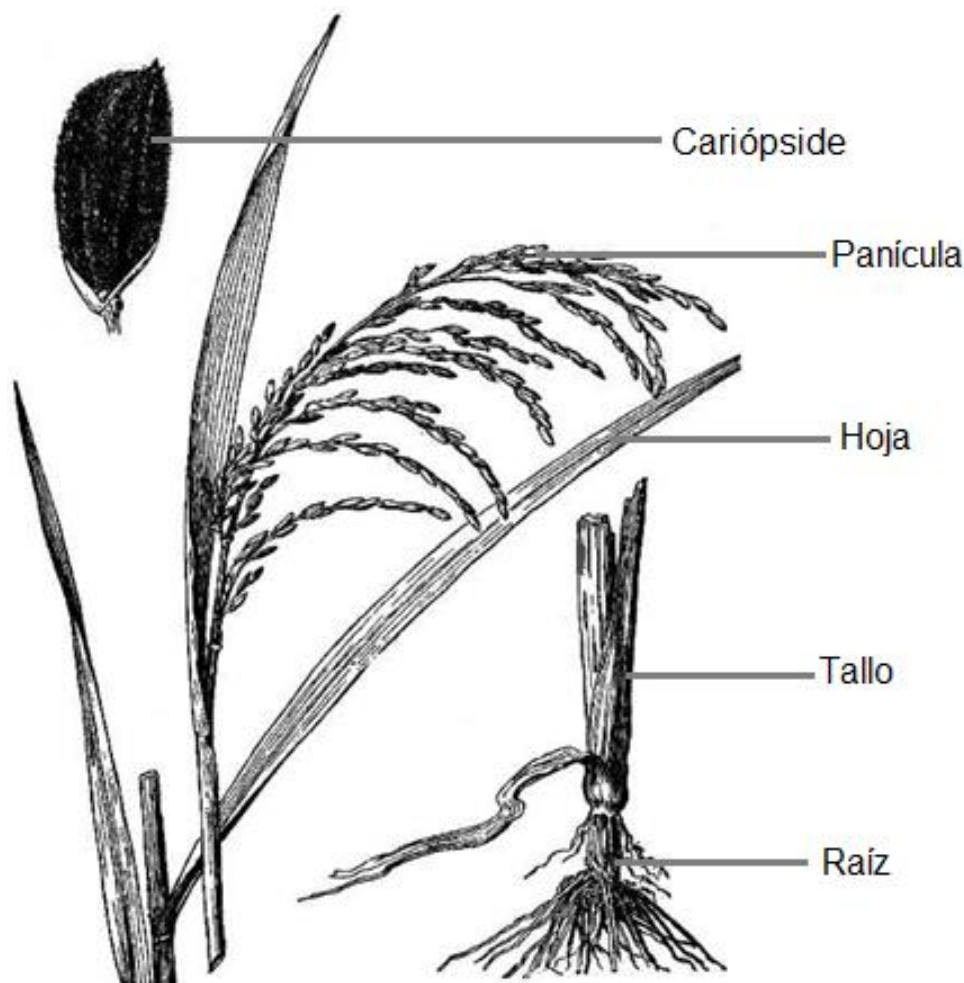


## 4. GENERALIDADES DE LA CASCARILLA DE ARROZ

### 4.1. DESCRIPCIÓN

El arroz es un cereal de gran importancia para muchas naciones alrededor del mundo, hace parte de la familia de las Poáceas del reino vegetal. Las dos especies domesticadas de arroz para su cultivo son la *Oryza sativa* y *Oryza glaberrima*, ambas plantas nativas de la región tropical y subtropical del sur de Asia y el sudeste de África (Gnanamanickam, 2009). Su tamaño puede variar desde 50 cm en cultivos modernos hasta 500 cm para el caso de arroz en aguas profundas (Dendy & Dobraszczyk, 2004). Se muestra a continuación en la Figura 2 una representación de una planta de arroz, donde se puede apreciar a grosso modo las partes fundamentales constituyentes del arroz como: raíz, tallo, hojas, panícula y cariósipide.

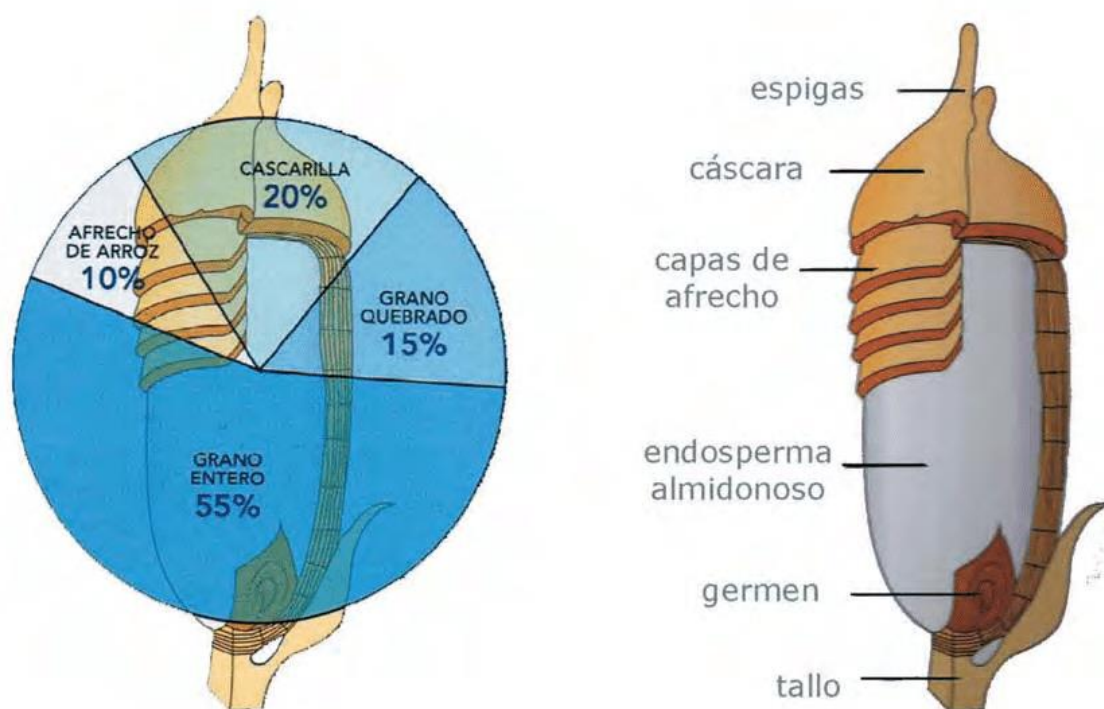
Figura 2. Representación gráfica de la planta de arroz.



**Fuente:** (Gnanamanickam, 2009).

La cariósipide puede apreciarse con mayor detalle en la Figura 3 donde se muestra las partes y los respectivos porcentajes; se resalta el valor de 20% en peso correspondiente a la cascarilla.

Figura 3. Representación gráfica del grano de arroz paddy.



**Fuente:** (García, Lanfranco, & Hareau, 2012)

## 4.2. BREVE RESEÑA HISTÓRICA

Registros históricos muestran que el cultivo de este importante cereal se remonta alrededor del año 5.000 a.C. en China y 4.500 a.C. en Tailandia, de donde se derivaron dos importantes especies, la Japónica y la Indica; las anteriores se extendieron a lo largo y ancho de Asia, en países como Birmania, Indonesia, Filipinas, Japón, Corea, Pakistán, Sri Lanka, entre otros. Alrededor del año 800 a.C., la especie de arroz *Oryza sativa* fue adaptada en el mediterráneo y medio este de Europa; en el siglo XV se extendió en Italia y Francia, para posteriormente ser cultivada a largo y ancho del viejo continente. Los españoles la llevaron a América del Sur a comienzos del siglo XVIII (Gnanamanickam, 2009).

Acerca de la historia del arroz en Colombia, se encuentran menciones del historiador Fray Pedro Simón (1574 d.C.-1626 d.C.) para el periodo de 1580 – 1620, en la descripción de la zona de Tocaima, Ibagué y los Remedios (Antioquía) donde puntualiza: “Arroz, que se da maravillosamente y sin los trabajos que cuesta criarlo en el Reino de Murcia y Valencia en España, pues sólo siembran como el trigo, y sin más beneficio ni riego crece y se sazona hasta

cogerlo” (Pedro Simón, 1892, p. 131). Se conoce que el arroz hace más de tres siglos fue introducido en el municipio de Prado y en el año 1778 por los Jesuitas en San Jerónimo (Antioquía). En los llanos orientales se sabe que hacia 1908 comenzó la siembra de manera comercial, la cual, hacia uso de la mano de obra de los prisioneros de una colonia penal situada a 130 km de Santa Fe de Bogotá, a cargo del general Mariano Ospina Chaparro. En el año 1914 entró en funcionamiento el primer molino de arroz con una capacidad de 4.800 kg/día (Sierra Aguilar, 2009).

#### **4.3. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LA CASCARILLA**

La cascarilla de arroz es una fibra corta que recubre de manera natural al grano y le otorga protección contra microorganismos, oxígeno atmosférico, humedad y luz ultravioleta (Sierra Aguilar, 2009). La longitud puede variar de 5 a 11 mm de acuerdo con la especie. Tiene estructura ondulada y apariencia superficial irregular, es abrasivo y en estado natural su dureza es de 6 en la escala de Mohs; su coeficiente de conductividad térmica es de 0,0360 W/m K, otorgándole propiedades como aislante térmico (Quiceno Villada & Mosquera Gutierrez, 2010).

Está constituida principalmente por materia orgánica, entre un 10 a 20 % en sustancias inorgánicas dependiendo de la variedad, condiciones agroclimáticas y tiempo de cosecha. Su composición elemental es 37,05% C, 8,80% H, 11,06% N, 9,01% Si y 35,05% O, Na, K, Fe, Ca, Mg y P en porcentajes inferiores a 1%. La composición química y elemental varía de acuerdo a la región de cultivo, sin embargo, de manera general se puede afirmar que la cascarilla de arroz está compuesta aproximadamente de 24,3% de hemicelulosa, 34,4% de celulosa, 19,2% de lignina, 18,85% de cenizas y 3,25% de otras sustancias (Soltani et al., 2015). En la Tabla 3 se muestra las composiciones reportadas en la literatura científica; se resalta el trabajo de Marrugo y colaboradores (2016), pues el trabajo corresponde a cascarilla de arroz sembrada en Colombia.

El poder calorífico inferior (PCI) reportado en la Tabla 3, es de aproximadamente 14,10 MJ/kg, por otro lado, también se reporta un valor de 15,07 MJ/kg y para el tamo de 13,02 MJ/kg. La anterior variabilidad en los valores de PCI son una muestra clara como las propiedades fisicoquímicas cambian en función de las condiciones de siembra, líneas arriba señaladas. Por otro lado, el alto contenido de celulosa y lignina 39,65% y 35,84% respectivamente, junto con un porcentaje de cenizas cerca al 20% son las que le confieren las características únicas a la cascarilla, que para muchas aplicaciones pueden llegar a ser dificultades de tipo técnico, potencialmente aprovechables como ocurre al ser usada para la síntesis de materiales avanzados.

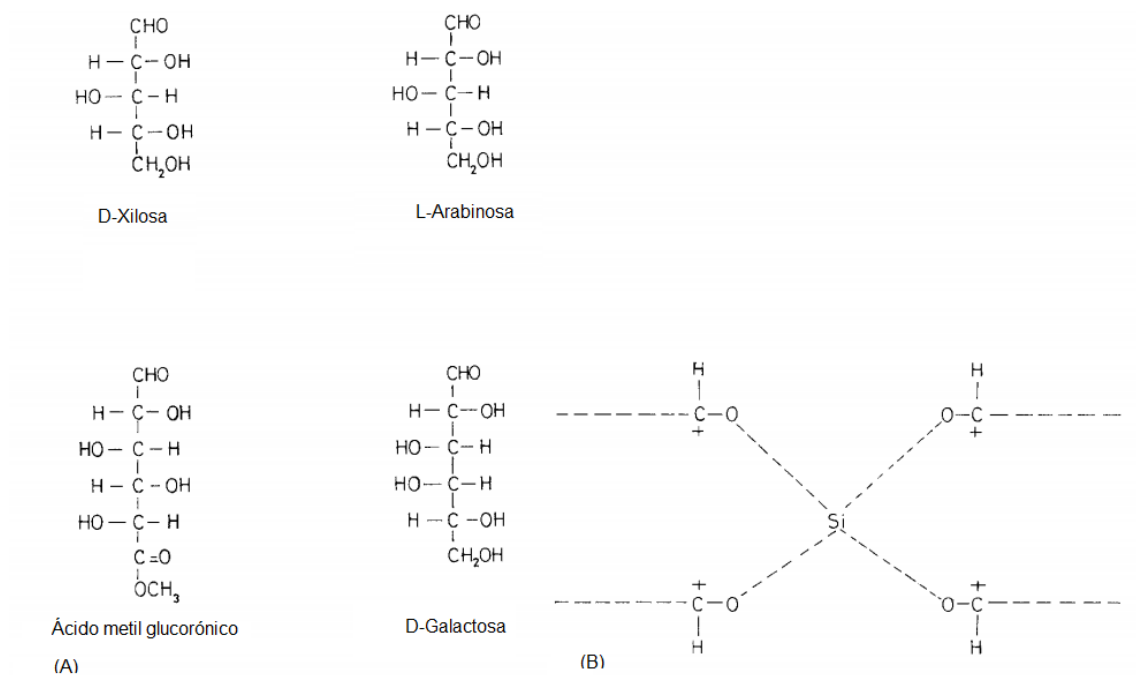
Tabla 3. Composición termoquímica de la cascarilla de arroz.

Parámetro	Reportado por Beidaghy Dizaji et al 2019	Reportado por Marrugo et al 2016
Contenido humedad, p/p% BS	8,79	6,92
Contenido de cenizas, p/p% BS	16,3	19,33
Materia volátil, p/p% BS	65,77	55,85
Carbono fijo, p/p% BS	15,92	17,9
C, BSLC	41,49	33,8
O, BSLC	38,51	40,2
H, BSLC	5,31	4,9
N, BSLC	0,84	1,4
S, BSLC	0,08	0,01
Cl, BSLC	0,11	-
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	14,14	14,09
Celulosa, p/p%	32,87	39,65
Hemicelulosa, p/p%	26,09	24,5
Lignina, p/p%	21,73	35,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,34	-
CaO	1,23	2,52
Cl	0,34	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,23	1,11
K <sub>2</sub> O	4,31	6,01
MgO	0,72	0,805
MnO	0,13	-
Na <sub>2</sub> O	0,19	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,05	-
SiO <sub>2</sub>	89,92	83,76
SO <sub>3</sub>	0,68	-
TiO <sub>2</sub>	0,02	-

**Fuente:** Tomado y Adaptado de Beidaghy Dizaji et al 2019 y Marrugo et al 2016. BS, base seca, BSLC, base seca libre de ceniza.

La cascarilla presenta un alto contenido de dióxido de silicio, el cual se encuentra enlazado a carbohidratos mediante enlaces oxígeno-carbono, fundamentalmente con cuatro monosacáridos D-xilosa, L-arabinosa, ácido metil glucorónico y D-glucosa, como se muestra en la Figura 4 (Patel, Karera, & Prasanna, 1987). El silicio se encuentra presente en toda la cascarilla, pero está concentrado principalmente en protuberancias, filamentos y en los alrededores de la epidermis (Soltani et al., 2015).

Figura 4. Estructura química de azúcares en cascarilla.

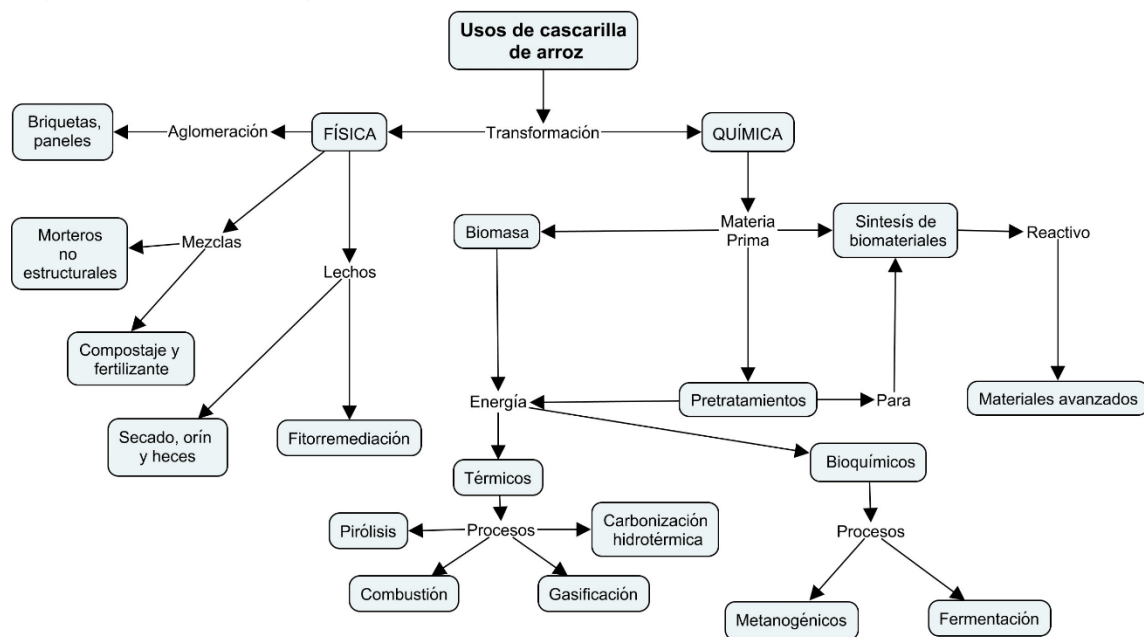


**Fuente:** (A) Estructura de azúcares presentes en la cascarilla. (B) Posible estructura química (Patel et al., 1987).

## 5. APLICACIONES

Los usos de la cascarilla son diversos, con aplicaciones que implican cambios físicos, hasta aplicaciones que demandan de procesos de transformación química. Esta clasificación puede ser un poco burda, más aún si se tiene en cuenta que las oxidaciones por procesos de meteorización son también transformaciones químicas. El propósito de clasificar los usos en transformaciones de carácter químico y físico tiene por objeto resaltar los principales cambios ocurridos, para utilizar la cascarilla. La Figura 5 se muestra las principales aplicaciones reportadas en la literatura

Figura 5. Esquema general de los usos de cascarilla de arroz.



Fuente: Elaboración propia.

### 5.1. TRANSFORMACIONES FÍSICAS

#### 5.1.1. Aglomerados

##### 5.1.1.1. Briquetas

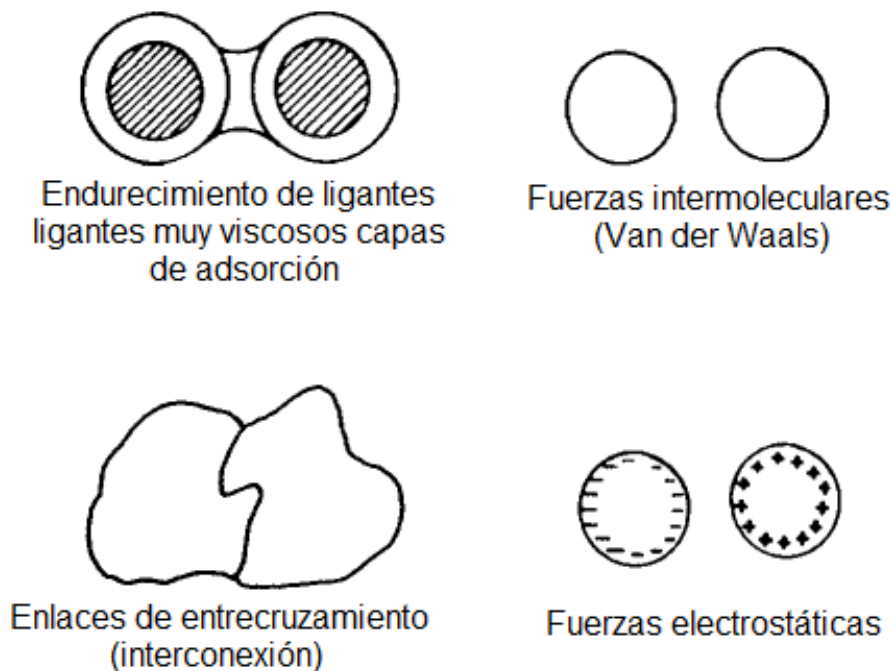
Las briquetas o bloques sólidos son aglomerados de biomasa, utilizado como estrategia para reunir materiales particulados de modesto tamaño, en unidades compactas de fácil manejo para biocombustibles. Es bien sabido que el tamaño de partícula está directamente relacionado con el área superficial del material, esta última característica afecta la velocidad de las reacciones químicas, por lo tanto, en procesos de combustión es necesario controlar la velocidad de oxidación de la materia orgánica a través del control del tamaño del biocombustible sólido. Por otro lado, una briqueta permite compactar la biomasa

incrementando su densidad y consecuentemente la cantidad de energía por unidad de volumen (Fonseca Cuenca & Tierra Tingo, 2011).

Las briquetas pueden ser fabricadas, sometiendo biomasa sólida altas presiones y calentándola dando lugar a autoaglomeración de las partículas, o utilizando una sustancia química que promueva la aglomeración a bajos valores de temperatura y presión (aglomerantes). Entre las propiedades que afectan el proceso, se encuentran: presión, temperatura, humedad, características químicas de la materia prima y tamaño de partícula.

En la Figura 6 se muestran los cuatro tipos principales de interacciones que ocurren en el briquetado. En primer lugar, el endurecimiento de ligantes da por resultado la unión entre partículas. Las fuerzas intermoleculares de Van der Waals también conocidas como fuerzas de dispersión, se generan por polarización parcial, permanente o inducida en las moléculas, dando lugar a atracción de cargas diferentes entre partículas con esa propiedad. La interconexión mecánica ocurre debido a la forma de las partículas que se unen entre ellas; las fuerzas electrostáticas corresponden a la interacción entre partículas con cargas opuestas y en consecuencia se atraen.

Figura 6. Tipo de interacciones en el briquetado.



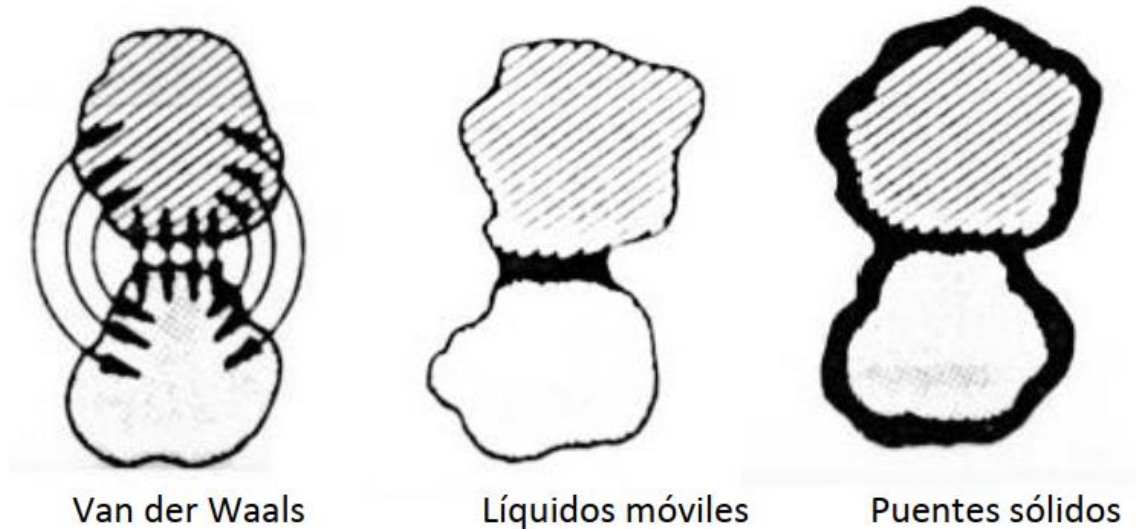
**Fuente:** (Grover & Mishra, 1996)

Las partículas de cascarilla de arroz y el aserrín de madera, son atraídos principalmente por fuerzas de Van der Waals cuando se aglomeran en briquetas. Cuando se utiliza aditivos aglutinantes se puede generar enlaces líquidos móviles



y puentes sólidos, que aglomeran las mencionadas partículas de biomasa. En la Figura 7 se muestra los mecanismos principales por los cuales se aglomera la cascarilla de arroz y aserrín.

Figura 7. Mecanismos principales de interacción.



**Fuente:** (Fonseca Cuenca & Tierra Tingo, 2011)

La densificación de biomasa o briquetado puede hacerse a escala artesanal, semi-industrial e industrial. En el primer caso se manejan presiones inferiores a 5 MPa, utilizándose sustancias aglomerantes como estiércol de animales, papel, aserrín, almidones y arcillas; la humedad del material deseada debe ser superior a 20%. A escala semi-industrial las presiones de trabajo varían entre 5 – 100 MPa, contrario del artesanal puede hacerse de manera semicontinua, las humedades recomendables pueden variar de 15 a 20%. Finalmente, a nivel industrial las presiones superan los 100 MPa, se lleva a cabo de manera continua y las humedades optimas oscilan entre 5 a 15% (Fonseca Cuenca & Tierra Tingo, 2011).

Fonseca y Tierra (2011) reportan que la cascarilla de arroz debe ser sometida a molienda, de tal manera que el tamaño de partícula sea inferior a 3 mm; utilizándose un 10% de cola blanca como aglutinante y sometida a una presión de 13,95 MPa, se obtienen briquetas con densidades de 583 kg/m<sup>3</sup>, resistencias al aplastamiento de 1933,87 N y un poder calorífico superior de 16,9 MJ/kg. Formulaciones consistentes en 20% de aglomerante y 80% de cascarilla de arroz, en las cuales se utilizan resinas de algarrobo, eucalipto y pino; dan lugar a aglomerados con poderes caloríficos de 18,5 MJ/kg (Cieza Orrillo & Rivadeneyra Larrain, 2013).

De manera general el proceso de preparación de briquetas a nivel artesanal e industrial consta de los siguientes pasos (Fonseca Cuenca & Tierra Tingo, 2011):



- 1) Recolección de materia prima.
- 2) Clasificación.
- 3) Reducción de tamaño de partícula.
- 4) Adicción y mezclado de aglutinante,
- 5) Compactación de la mezcla.
- 6) Secado de las briquetas.
- 7) Almacenamiento y/o distribución del producto.

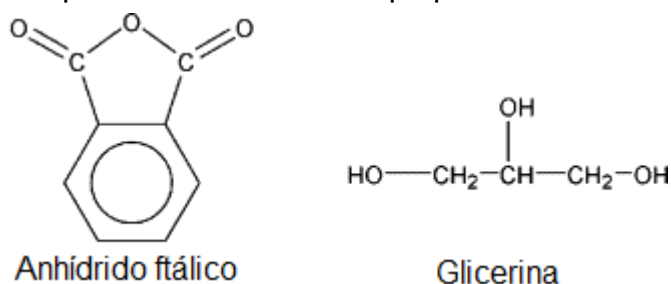
#### **5.1.1.2. Paneles**

Los paneles o tableros de fibra vegetal a base de cascarilla de arroz es un tipo de aglomeración que puede ser usada como material de construcción. Casas (2015) estudio la preparación de tableros con cascarilla y almidón, sometiéndolos a las pruebas establecidas por la norma americana ASTM D1037-12 y la norma europea UNE-EN-312:2010. Encontrando que los tableros obtenidos en su propuesta metodológica cumplen con los requisitos en resistencia a la flexión y cohesión interna para uso general y utilización en ambientes secos; adicionalmente, en la prueba de resistencia de arranque de superficie la formulación propuesta en su investigación no cumple con los valores mínimos exigidos por la norma (Casas Sandoval, 2015). El uso de almidón como aglomerante es una alternativa biodegradable, con desempeños mecánicos aceptables pero con la dificultad que este tipo de paneles se deforman en presencia de agua (Calero Quezada & Vásconez Peñaherrera, 2012).

Chumo y González (2017) estudiaron los efectos de mezcla de cascarilla, bagazo de caña y resina para su uso como tablero aglomerado, encontrando que la mezcla de 66,6% de cascarilla, 16,7% de bagazo y 16,7% de pegamento resina, genera los mejores resultados, en cuanto a cumplimiento de la norma técnica ecuatoriana INEN 310-319 y costos de producción (Chumo Zambrano & González Velásquez, 2017).

También se ha estudiado el efecto de tratamientos químicos en medio ácido, alcalino, a pH 1, 4, 7, 10 y 12; la cascarilla fue sometida a un proceso de reducción de tamaño clasificándose en tres diferentes tipos, a saber: pequeño (150  $\mu\text{m}$ ), mediano (425  $\mu\text{m}$ ) y grande (900  $\mu\text{m}$ ). La resina usada como aglutinante en porcentajes de 15, 17,5 y 20%, es una alquil hidroxilada, de acuerdo con Vargas (2014) fue “catalizada” con poliisocianato; este tipo de resinas son poliésteres orgánicos constituidos por un ácido polibásico y un alcohol polihidroxilado, ejemplo de este tipo de sustancias se muestra en la Figura 8.

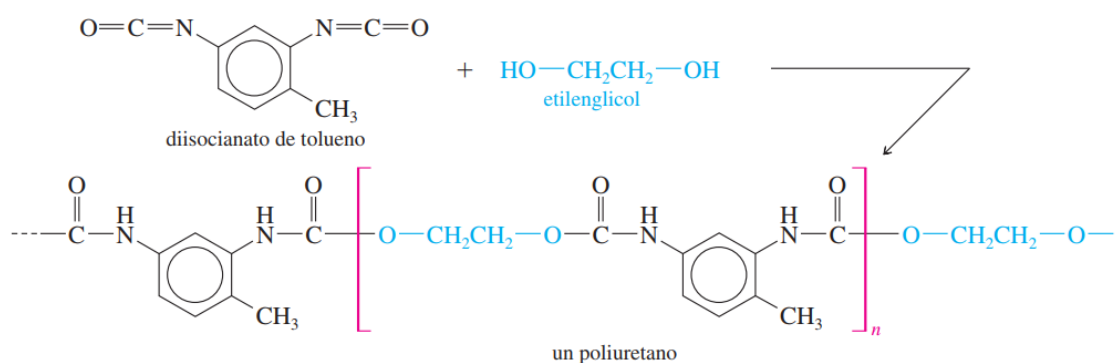
Figura 8. Estructura química de resinas de tipo poliéster.



**Fuente:** Tomado de (McKeen, 2006).

Las reacciones químicas entre alcoholes polihidroxilados es de tipo  $\text{SN}_2$  y un ejemplo de ello se muestra en la Figura 9, donde puede observarse la reacción entre el diisocianato de tolueno y el etilenglicol; es importante resaltar que en el argot de los polímeros se utiliza la palabra catalizador para una sustancia que inicia la reacción de polimerización, sin embargo, la mencionada palabra tiene otro significado en el contexto químico, ya que la sustancia catalizadora tiene que ser obtenida al final de la reacción, de lo contrario sería otro reactivo más.

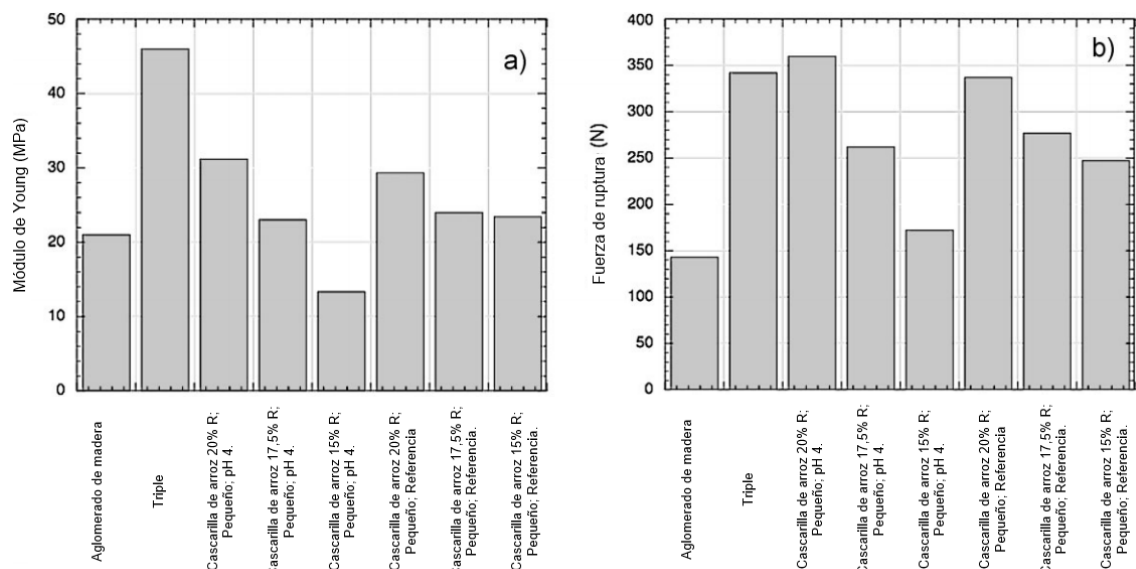
Figura 9. Reacción química entre diisocianato de tolueno y etilenglicol.



**Fuente:** Tomado de (Wade, 2011).

Retomando el trabajo de Vargas (2014) los resultados encontrados muestran que el tratamiento ácido incrementa la elasticidad de los paneles obtenidos, evidenciado en el módulo de Young. El tratamiento alcalino presenta un comportamiento en cuanto a propiedades mecánicas semejantes a la cascarilla sin tratamiento, por lo cual, resulta más práctico no realizar tratamiento en medio básico, ya que incrementa los costos de producción. Es importante resaltar que los mejores resultados del diseño experimental se encuentran para concentraciones de resina del 20% en peso, tamaño pequeño y pH 4 (Vargas, Rodríguez, Lobland, Piechowicz, & Brostow, 2014). Una comparación entre los paneles preparados se muestra a continuación en la Figura 10.

Figura 10. Comparación de propiedades mecánicas de diferentes materiales aglomerados.



**Fuente:** Tomado de (Vargas et al., 2014), donde R corresponde a la resina.

La Figura 10 se muestra como los aglomerados de cascarilla de arroz con resina poliisocianato-alkil-hidroxilada presentan un módulo de Young superior que los aglomerados de madera, a excepción de la cascarilla tratada en medio ácido a pH 4; el triplex tiene el valor más alto en módulo de Young. Por otro lado, los aglomerados de cascarilla presentan una mayor resistencia de ruptura (fuerza de ruptura en newtons) si se compara con el aglomerado de madera; para el caso del tratamiento en ácido a pH 1 y con una proporción de resina del 20%, es superior que el triplex, seguidos muy de cerca del aglomerado de cascarilla sin tratar con una proporción de resina del 20%.

Los resultados antes mostrados indican la factibilidad técnica de preparar tableros o paneles aglomerados. A nivel nacional existe una empresa que se dedica a la fabricación y venta de tableros aglomerados de cascarilla de arroz, su razón social es: Tableros aglomerados de cascarilla de arroz E.U., con sede en Barranquilla Atlántico. En el departamento de Casanare a la fecha no existe empresas dedicadas a este actividad productiva, a pesar de ser el departamento con mayor producción del país (DANE & FEDEARROZ, 2018b, 2018c).

## 5.1.2. Mezclas

### 5.1.2.1. Morteros no estructurales

La densidad de la cascarilla oscila entre  $120 \text{ kg/m}^3$  a  $130 \text{ kg/m}^3$  (Sierra Aguilar, 2009) y la baja conductividad térmica permiten utilizarla sin pretratamientos de calcinación u otros, para mezclas con concreto. Sin embargo, se ha investigado el efecto del tratamiento con ácido y alcalino en cascarilla, para evaluarse en

mezclas de mortero. Las características morfológicas y absorción de agua de la cascarilla demandan del uso de tensoactivos para la elaboración de composites. El pretratamiento con ácido inhibe las reacciones químicas del proceso de fraguado, contrario al caso alcalino que favorece el fraguado y endurecimiento. Con las modificaciones antes mencionadas se puede obtener morteros ligeros con densidades de 1,1 g/cm<sup>3</sup> a 1,3 g/cm<sup>3</sup> y resistencias mecánicas de 2 a 4 MPa; los anteriores resultados indican que es factible su uso para la preparación de unidades no estructurales, en especial como aislante térmico (Serrano, Borrachero, Monzó, & Payà, 2012). Resultados semejantes también fueron obtenidos por García y colaboradores, quienes determinaron que el porcentaje óptimo de adición de cascarilla era de 8%, obteniéndose morteros ligeros de uso no estructural (Álvarez García & Ardila Pérez, 2011).

Considerando los importantes resultados en cuanto a uso directo como agregados para morteros no estructurales y la demanda de materiales de baja conductividad térmica, se evidencia que es necesario realizar investigaciones en cuanto a la conductividad térmica del concreto aligerado con cascarilla de arroz (Guarin, Molina, & Díaz, 2017). Se resalta que el tratamiento en medio alcalino puede remover el silicio de la cascarilla, obteniéndose silicato de sodio en solución acuosa, de gran interés para la síntesis de sílice de tamaño nanoscópico (Ghorbani, Sanati, & Maleki, 2015).

### **5.1.3. Compostaje y fertilizantes**

Es bien conocido el uso extendido de la ceniza de cascarilla de arroz como fertilizante para suelos, ya que permite la reincorporación de nutrientes, principalmente minerales. Estudios reportan la mejora en producción agrícola con la aplicación de la ceniza, mejorando hasta en un 54% (Sharifzadeh et al., 2019). Aunque la anterior revisión advierte que solamente se realizó un solo estudio en esa investigación, es bien conocido que las plantaciones de palma africana en el Departamento de Casanare compran a los molinos la ceniza de cascarilla y la aplican a sus suelos productivos.

La cascarilla es mezclada directamente con suelo y estiércol de vaca, para ser usada como fertilizante en los cultivos de *Pometia Pinnata* en Indonesia, encontrándose que estimula el crecimiento de las plantas (Santosa, Priosambodo, & Santosa, 2019). También se ha reportado el uso de cascarilla con mezclas de suelo y materia orgánica en los cultivos de limón con mejoras en los rendimientos de producción (Castillo & Julca, 2018).

En la mayoría de los viveros se utiliza cascarilla de arroz en la preparación de abonos, la cual puede aportar algunos nutrientes como oligominerales, por disolución en presencia de agua. Se destaca la función como material anticompactante en las mezclas con suelo, manteniendo la granulometría de este a lo largo del tiempo. Es importante resaltar que la biodegradación de la cascarilla

es lenta y en procesos de compostaje con bosta de caballo o bovinaza, su desempeño no es el más óptimo (Montalvo et al., 2018).

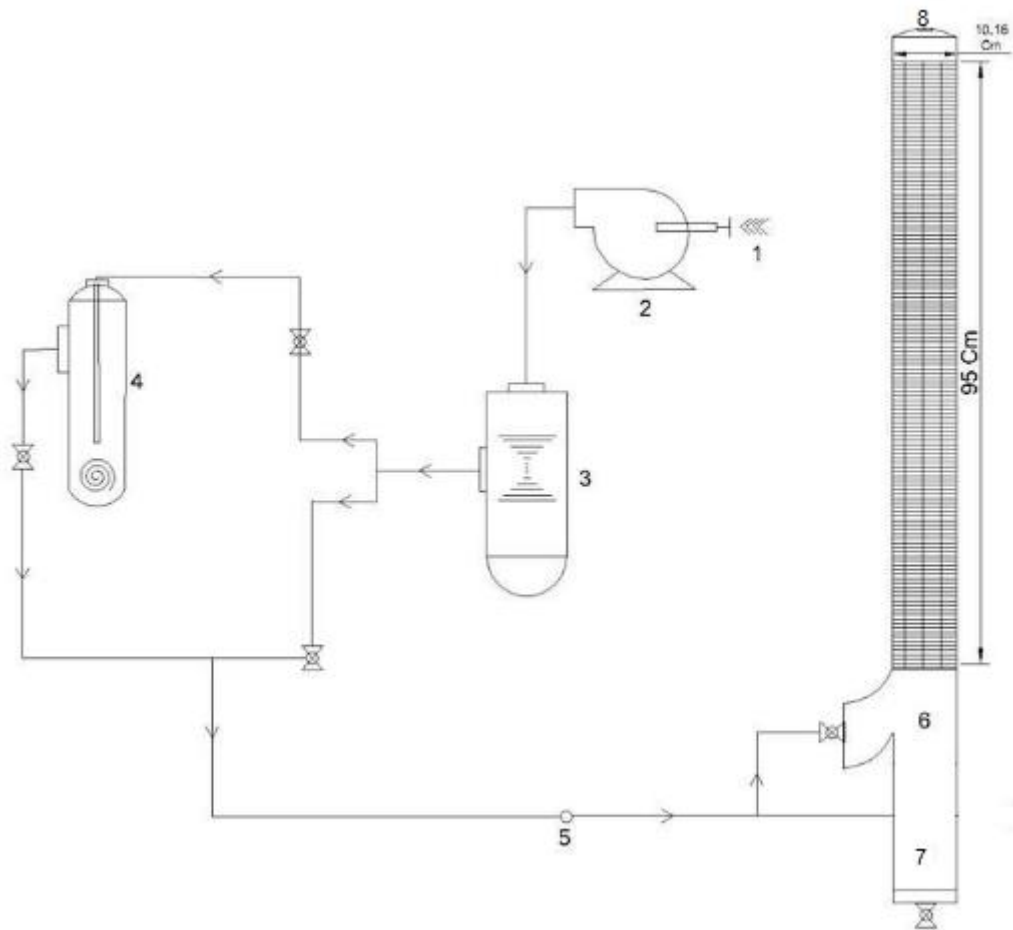
#### **5.1.4. Lechos y biofiltros**

Las características físicas de la cascarilla como superficie irregular y volumen poroso de 54% (Cadena & Bula Silvera, 2002), aunado al alto contenido de lignina y cenizas, le confieren adicionalmente estabilidad química y un área superficial apropiada para soporte de microorganismos biodegradantes de la materia orgánica. Las anteriores características hacen de la cascarilla un material potencialmente útil como lecho o soporte para biofiltros.

Aguas residuales provenientes de una empresa de lavado de automóviles ubicado en el Cantón Tisaleo, Provincia de Tungurahua, Ecuador, fueron tratadas con un filtro de cascarilla de arroz. El dispositivo constaba de un sistema de aspersión horizontal sobre un lecho contenido en una caja de 0,75x0,42x0,34 m. El agua permeada por el biofiltro fue sometida a estudio durante 90 días, midiéndose cada diez días aceites y grasas, demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y demanda química de oxígeno (DQO). La normatividad ambiental ecuatoriana establece los siguientes límites para los parámetros antes mencionados: 70 mg/L, 250 mg/L O<sub>2</sub> y 500 mg/L O<sub>2</sub>, respectivamente. Se encontró que después del día 20, el sistema podía reducir la DQO y DBO<sub>5</sub>, dando cumplimiento con lo exigido por la norma; a pesar que las grasas y aceites fueron reducidas considerablemente, superaron durante el estudio el límite 70 mg/L (Sailema Sánchez, 2017). Es importante mencionar que los límites establecidos en Colombia en la resolución 0631 del 2015, para este tipo de actividad los valores permitidos son: 150 mg/L O<sub>2</sub> DQO, 50 mg/L O<sub>2</sub> DBO<sub>5</sub> y 10 mg/L grasas y aceites. Entonces considerando la normatividad colombiana la depuración del biofiltro no cumpliría, sin embargo, no deja de ser un tema de investigación importante que podría ser optimizado para ser aplicado en nuestro país.

La cascarilla de arroz también puede ser sometida a un proceso de compostaje para ser usada como biofiltro. En esa dirección se reporta el compostaje con pollinaza durante 60 días, para remover carga contaminante de ácido acético proveniente de la industria avícola. El dispositivo de tratamiento de agua residual se muestra en la Figura 11 en escala piloto. Los investigadores encontraron que para cargas de contaminantes de 200 ppm y 300 ppm el porcentaje de remoción era de 99,9% y para la concentración de 400 ppm descendía a 77,1% (Forero Polania, Peña Beltran, & Ambiental, 2017).

Figura 11. Dispositivo piloto de sistema de tratamiento de agua residual.

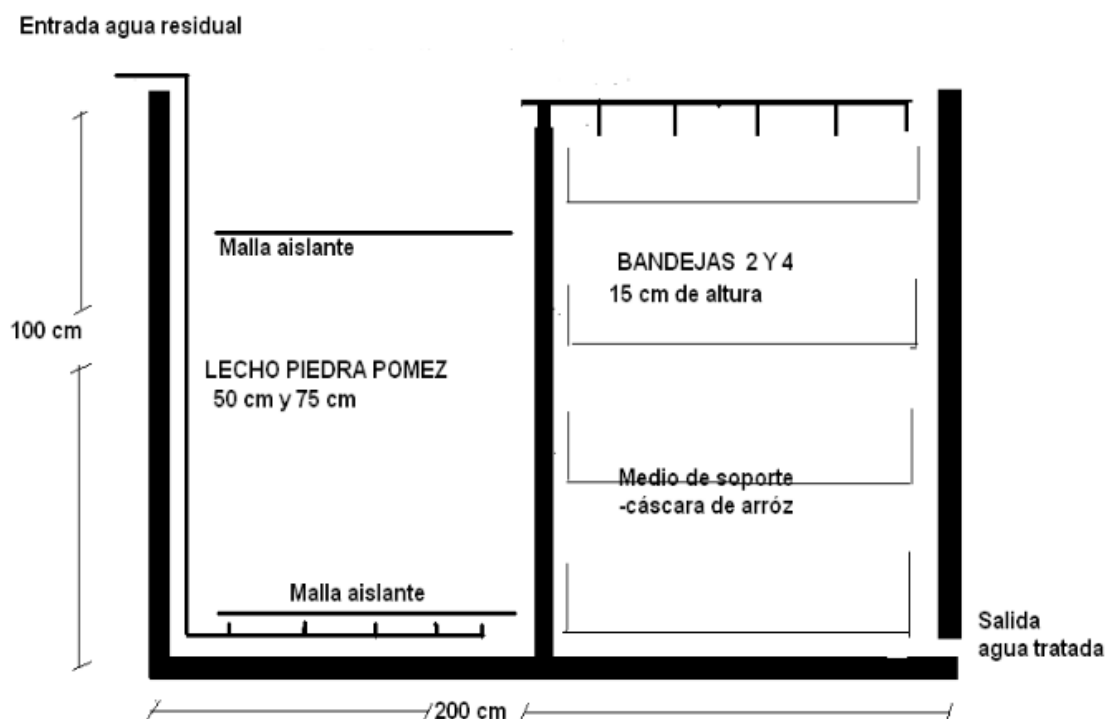


**Fuente:** Tomado y adaptado de (Forero Polania et al., 2017). En la imagen, (1) entrada de aire; (2) compresor; (3) zona de humidificación de aire; (4) zona de volatilización del contaminante; (5) punto de muestreo a la entrada; (6) biofiltro; (7) drenado de agua; (8) salida del gas de biofiltro y drenado, punto de muestreo puerto de salida. Tiempo de retención del equipo fue de 66 segundos.

También se ha utilizado la cascarilla de arroz junto con piedra pómez en un reactor de tratamiento de agua de canales de riego como se ilustra en la Figura 12, donde se dispone de una primera filtración de lecho de piedra pómez de 50 cm y 75 cm; un segundo paso de filtración de cascarilla de arroz en dos y cuatro capas de 15 cm, cada una. Teniendo en cuenta estos espesores en los medios filtrantes se realiza arreglos variando el espesor de piedra pómez y de cascarilla de arroz. A medida que el reactor funciona la lignina de la cascarilla de arroz se hidroliza, liberando compuestos fenólicos con actividad antimicrobiana, lo cual ayuda a la reducción de la carga microbiológica presente en el agua. A pesar que el reactor logra reducir la demanda química y bioquímica de oxígeno, hasta en 53,7% para el sistema de 75 cm de piedra pómez y cuatro capas de cascarilla de arroz de 15 cm, no es suficiente para depurar el agua hasta el punto de alcanzar

los valores límites establecidos por la normatividad ecuatoriana (Mayorga & Villacrés, 2015).

Figura 12. Dispositivo de tratamiento de agua residual con biofiltros de cascarilla.



**Fuente:** Tomado de (Mayorga & Villacrés, 2015).

En Colombia se han realizado pruebas de uso de biofiltro de cascarilla sin modificación química. Algunos ejemplos de estos se encuentran en el tratamiento de aguas lluvias en procesos de cosecha de agua. Se han probado filtros empacados de *Luffus cylindrica* y cascarilla (Suárez, Mesa, Bravo, & Prieto, 2015), arrojando reducción en parámetros como dureza, turbiedad, sólidos suspendidos totales, conductividad, pH y color. Como ambos materiales filtrantes son de origen biológico, se observa actividad microbiológica, como crecimiento de algas en los biofiltros preparados; a pesar de que la reducción en los parámetros de calidad del agua lluvia no es significativa, queda abierta la posibilidad de pretratamientos en cascarilla que mejoren su capacidad de intercambio iónico (Prieto Núñez, 2019).

#### 5.1.4.1. Material de secado, camas para animales

El uso como material de secado y cama para animales es quizás uno de los usos más extendidos que se da a la cascarilla en la región de Casanare; sin lugar a duda es una solución temporal que, al ser estudiada desde el punto de vista de un análisis de ciclo de vida, plantea una problemática ambiental y fitosanitaria importante pues es necesario tratar de manera apropiada estos residuos con riesgo biológico. Una aplicación de este residuo es su uso como fertilizante y

compostaje, lo cual demanda de un plan de gestión de este residuo sólido. Por otro lado, las aplicaciones como materia prima para la síntesis de materiales avanzadas se ven limitadas por el hecho de contar con contaminación adicional que demandaría de procesos de lavado y adecuación.

#### **5.1.4.2. Fitorremediación**

En este tipo de procesos la cascarilla de arroz se utiliza como soporte o lecho para ser empleada en procesos de depuración de aguas mediante la actividad biológica de algunos tipos especiales de plantas. Un ejemplo importante de esta importante aplicación se puede encontrar en una investigación llevada a cabo en el departamento de Casanare. La matriz de agua a evaluar era agua residual proveniente de una PTAR del INPEC de Yopal, el objetivo depurar el agua para que cumpliera con las características fisicoquímicas y microbiológicas para ser usada como agua de riego agrícola. El montaje consistía en un humedal artificial de funcionamiento subsuperficial y un tiempo de retención hidráulico de 3,4 días. La planta de estudio fue pasto vetiver (*Chrysopogon Zizanioides*). Se encontró que las plantas crecían apropiadamente y la eficiencia de remoción de materia orgánica biodegradable medida como DBO<sub>5</sub> fue de 73.25%; sin embargo, la constante de velocidad para cambio de DBO<sub>5</sub> fue de 0,091 d<sup>-1</sup>. Al compararse con otras constantes cinéticas de velocidad de 1,1 y 1,25 reportadas para humedales artificiales es muy baja (Higuera Infante, 2017).

Otra investigación (Rodríguez, Zafra, & Balda, 2004) descarta el uso de cascarilla de arroz como soporte para humedales subsuperficiales, argumentando que al ser altera las características del agua por degradación. Por otro lado, la literatura científica señala que la cascarilla de arroz es un excelente substrato en sistemas verticales y horizontales, para facilitar la remoción de nitratos (Saeed & Sun, 2012) y materia orgánica (Kumar & Dutta, 2019).



Figura 13. Humedal artificial con lecho de cascarilla.



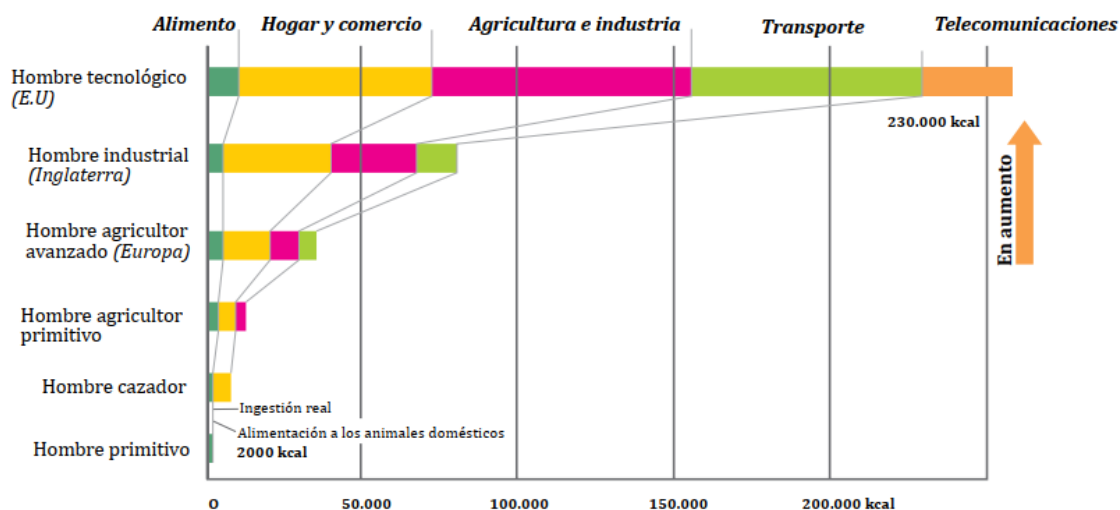
**Fuente:** Tomado de (Higuera Infante, 2016).

## 5.2. TRANSFORMACIÓN QUÍMICA

### 5.2.1. Biomasa

Conforme la complejidad tecnológica de las sociedades humanas ha evolucionado también la demanda energética ha incrementado. Los hombres primitivos que habitaban el África hace aproximadamente un millón de años se les calcula un consumo de energía de 2.000 kcal/día, que correspondía principalmente a su dieta alimentaria (Rodríguez Salcedo, González Salcedo, Rojas González, & Palacios Peñaranda, 2013).

Figura 14. Comportamiento histórico del consumo energético por el hombre.

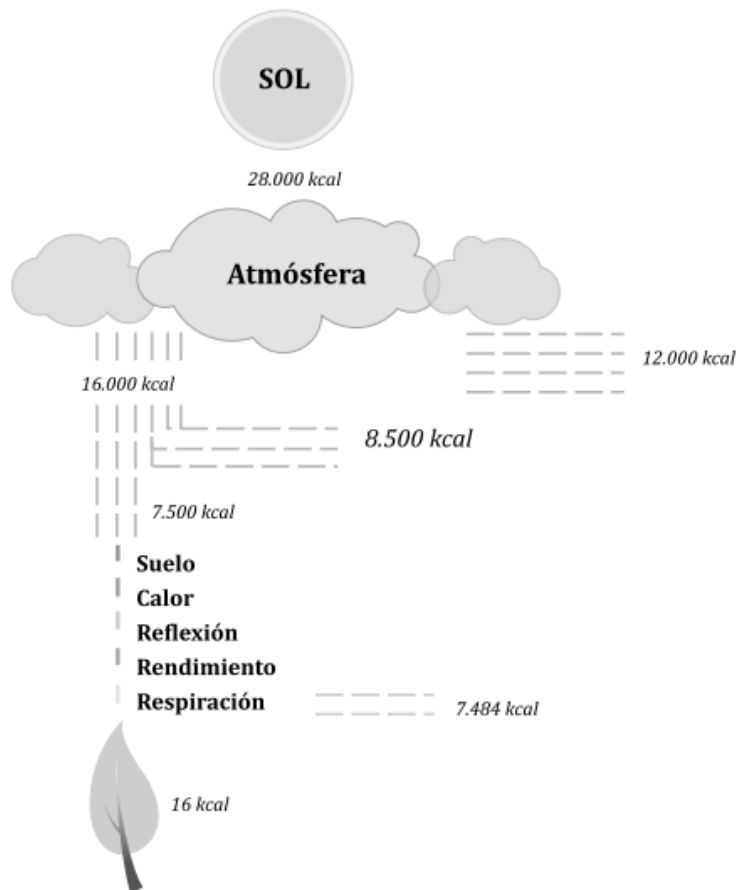


**Fuente:** Tomado de Rodríguez Salcedo et al (2013).

La Figura 14 muestra la evolución del consumo energético a través de algunos periodos históricos característicos. Se clasifican en cinco grandes ítems alimento (azul), hogar y comercio (amarillo), agricultura e industria (morado), transporte (verde) y telecomunicaciones (rosado). El hombre cazador incorpora la componente de hogar y comercio, que corresponde a la alimentación de algunos animales domésticos y actividades comerciales de trueque. El hombre agricultor primitivo incrementa el consumo energético en el ítem de alimento e incluye una pequeña componente de sus primitivas actividades agrícolas. El hombre agricultor avanzado (europeo) incorpora el componente de transporte, incrementando los consumos en las otras; de manera semejante el hombre industrial (Inglaterra) continúa incrementando el consumo en las mismas componentes que su antecesor. Finalmente, el hombre tecnológico (E.U) incluye la componente de telecomunicaciones e incrementa notablemente los consumos energéticos con respecto al hombre industrial en prácticamente tres veces y del hombre primitivo en ciento quince veces. Con lo anterior queda claro que la evolución tecnológica ha traído consigo incrementos notables en la demanda energética.

Es necesario resaltar que no todas las naciones presentan los mismos valores de demanda energética. Los países desarrollados como Estados Unidos tienen consumos energéticos por encima del promedio. Hecho que resalta la arraigada desigualdad social y económica de la sociedad moderna. En el año 2.012 el expresidente de Uruguay Pepe Mujica durante una conferencia en Río de Janeiro formulaba la siguiente pregunta: “¿qué le pasaría a este planeta si los hindúes (indios) tuvieran la misma proporción de autos por familia que tienen los alemanes? ¿Cuánto oxígeno nos quedaría para poder respirar?”. Afortunadamente, no todos seres humanos tienen el gasto energético que las sociedades más opulentas, pero la creciente demanda energética de las economías emergentes y la crisis medio ambiental han llevado a diversificar la canasta energética y a incorporar de manera intensiva energías renovables. Dentro de estas se destaca el uso de biomasa como fuente de energía alternativa.

Figura 15. Balance de la conversión biológica de la energía solar a biomasa.



**Fuente:** Tomado de Rodríguez Salcedo et al (2013).

Se calcula que la energía solar que irradia sobre la biosfera es  $3 \times 10^{24}$  J/año, la cual es captada y transformada por los ecosistemas terrestre y acuático con una eficiencia aproximada del 0,2%

### 5.2.1.1. Procesos térmicos

La cascarilla de arroz es una fuente de energía renovable, su poder calorífico es de 15.075 MJ/TM (Hernández, 2010), puede ser utilizada en procesos de combustión directa, pirólisis y gasificación (Quispe, Navia, & Kahhat, 2017), obteniéndose energía térmica (Huaripoma Vega, 2015); también puede peletizarse para favorecer procesos de alimentación del reactor y control de temperatura (Aguilar Sierra & Tulcán Álvarez, 2018). De igual manera para la producción de bioetanol (Piñeros-Castro, Velasco, Proaños, Cortes, & Ballesteros, 2011) y biogás (Candia-García, Delgadillo-Mirquez, & Hernandez, 2018).

#### 5.2.1.1.1. Pirolisis

Del griego pyros (fuego) y lysis (romper), el vocablo pirolisis etimológicamente es ruptura por fuego (Triana, 1984). La pirolisis es el proceso termoquímico en ausencia de oxígeno donde ocurre una transformación de la materia orgánica en fracciones gaseosas, líquidas y sólidas (Klug, 2012). Puede clasificarse de acuerdo con las condiciones de temperatura y productos a obtenerse como se muestra en la Tabla siguiente:

Tabla 4. Comparación entre tipos de pirólisis.

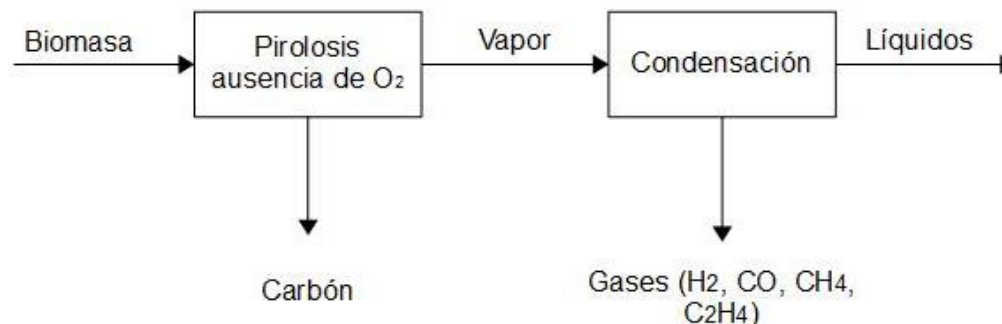
Modo	Condiciones	Líquido (%)	Carbón (%)	Gas (%)
Gasificación	~800 °C	5	20	85
Flash/rápida	~500 °C, tiempo de residencia de vapor caliente ~1 s.	75	12	13
Intermedio	~500 °C, tiempo de residencia de vapor caliente ~10 s – 30 s.	50	25	25
Carbonización lenta	400 °C, largo tiempo de residencia de vapor ~1 horas - días.	30	35	35
Torrefacción lenta	~290 °C, tiempo de sólidos ~30 min.	-	82	18

**Fuente:** Tomado de (Klug, 2012).

Es importante resaltar que la temperatura de trabajo depende en gran medida de las características de la materia orgánica a ser tratada. A diferencia de la mayoría de los procesos térmicos que son de tipo exergónico, la pirolisis requiere de una fuente de calor externa ya que el proceso es de tipo endotérmico. En los últimos años ha cobrado especial interés la pirolisis rápida, donde los procesos de intercambio de calor y de masa juegan un papel importante. La biomasa se descompone para generar vapores, aerosoles una cantidad de coque, este último también nombrado como biochar. El vapor condensado es un líquido marrón oscuro conocido como bioaceite con un poder calorífico de 20 MJ/kg correspondiendo a aproximadamente la mitad de los respectivos poderes de la gasolina de 44 MJ/kg y el diesel de 42 MJ/kg (Klug, 2012). La Figura 16 muestra

el proceso de pirólisis con sus respectivos reactivos y productos, es importante indicar que los gases también llamados por algunos autores syngas o gas pobre tiene un poder calorífico bajo.

Figura 16. Esquema de conversión térmica de biomasa a través de pirólisis.



**Fuente:** Tomado y adaptado (Quispe et al., 2017).

En la Tabla 5 se muestra los diferentes rendimientos en las categorías de bioaceite, singas y biocarbón de la pirólisis; se muestran las temperaturas de trabajo, así como las rampas de calentamiento para cada uno de los residuos agrícolas, los cuales permite establecer un comparativo con la cascarilla de arroz. Es importante resaltar que la pirólisis de cascarilla de arroz a 420°C y 450 °C con rampas de temperatura de 7, presentan los mayores rendimientos en producción de bioaceite que es uno de los principales objetivos de esta técnica termoquímica.

Tabla 5. Resultados de pirólisis de diferentes tipos de biomasa.

Residuo agrícola	Velocidad de calentamiento (°C min <sup>-1</sup> )	T (°C)	Bioaceite (%p/p)	Singas (%p/p)	Biocarbón (%p/p)
Cascara de avellana	7	400	20,1	18,9	47,5
		700	20,8	26,7	37,5
Pastel de colza	30	400	45,2	26,9	28,0
		700	47,7	32,5	19,8
Tallo de algodón	7	400	20,3	26,6	30,3
		700	18,6	32,0	25,6
Cascarilla de arroz	7	420	53,0	12,0	35,0
		450	56,0	15,0	29,0
Cascarilla de arroz	200	500	36,0	16,0	48,0
Cascarilla de arroz	10	600	30,0	32,0	38,0
Cascarilla de arroz	N.I.	450	50,0	20,0	30,0
Cascarilla de arroz	N.I.	450	70,0	26,0	4,0

**Fuente:** Donde N.I.= no información disponible. Tomado Quispe et al. (2017).

El bioaceite obtenido tiene una composición química compleja mostrada en la Tabla 6, la cual se muestra en grupos para facilitar su clasificación; como ya se mencionó el poder calorífico es de aproximadamente la mitad del diesel. De acuerdo a lo reportado por Muhammad et al. (2013) la mejora en el rendimiento y la calidad del bioaceite se puede lograr al emplear catalizadores como zeolitas y ceniza de cascarilla, alcanzando rendimientos hasta del 60% con poder calorífico de 24,8 MJ/kg (Feng, Zhang, Zhao, & Sun, 2018; Ghime & Ghosh, 2017; Nzihou, Stanmore, Lyczko, & Minh, 2019).

Tabla 6. Composición química de bioaceite obtenido por pirólisis.

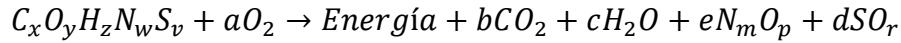
Grupo de componentes	Rendimiento (%)
Ácidos	7,07
Aldehídos	1,72
Cetonas	8,65
Fenoles	8,85
Éteres	2,73
Anhídridos carboxílicos	1,08
Furanos	3,97
Sacáridos	1,12
Compuestos nitrogenados	0,97

**Fuente:** (Alvarez, Lopez, Amutio, Bilbao, & Olazar, 2014)

La revisión hecha por Quispe et al. (2017) señala que la tecnología de pirólisis rápida es la más apropiada para el tratamiento de cascarilla. Sin embargo, es importante mencionar que trabajos como el Marrugo et al. (2016) sostienen que la gasificación es más eficiente que la pirólisis dado el contenido de carbono fijo de 22,78% y el alto contenido de lignina de 58,30%. Esta clara contradicción entre las referencias se justifica a la luz de considerar que la composición química de la cascarilla varía considerablemente en función de las condiciones agrícolas, temperatura y variedad. Lo anterior evidencia la importancia de estudios específicos de caracterización de la cascarilla para poder aplicar la tecnología más apropiada. Finalmente, es necesario concretar que la combustión es la tecnología que mejor aprovecha energéticamente este importante subproducto; en ese sentido la literatura de manera unánime lo sostiene (Marrugo, Valdés, & Chejne, 2016), hecho lógico pues en este proceso no hay varias etapas como si ocurre con los otros procesos termoquímicos.

#### 5.2.1.1.2. Combustión

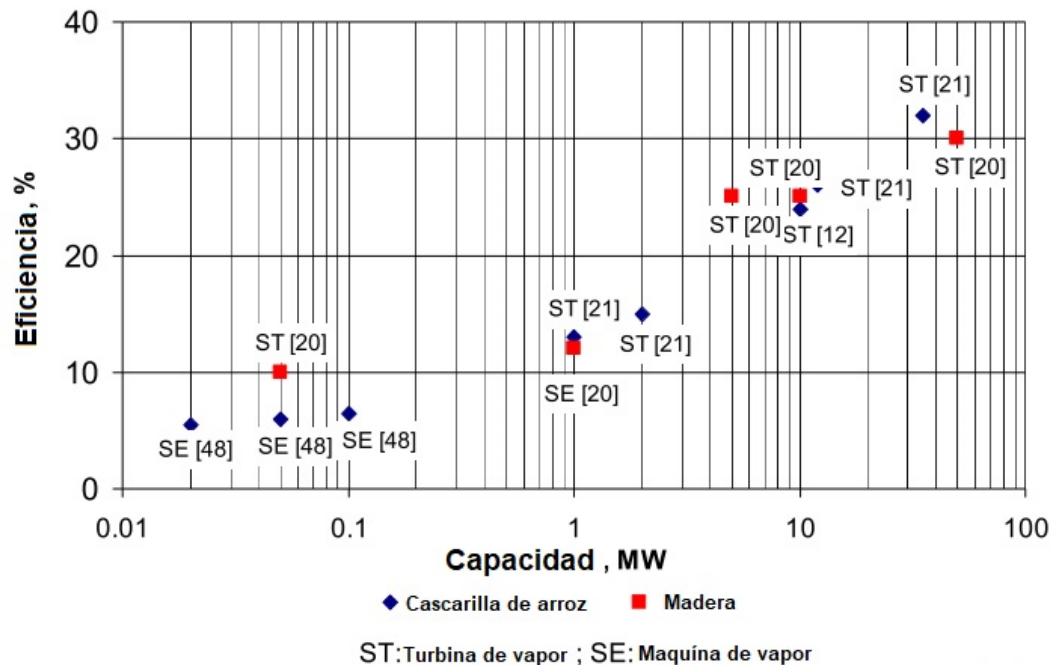
La combustión de la cascarilla y en general de la materia orgánica es un de las principales formas de obtener energía y vapor. Las tecnologías pueden variar desde simples hogueras artesanales y estufas, hasta sistemas más elaborados como camas de lecho fluidizado con turbinas (TORBED®) (Quispe et al., 2017). A nivel de transformación química la siguiente ecuación muestra la reacción general en exceso de oxígeno:



Dónde los subíndices x, y, z, w, v, m, p y r corresponden a números enteros indicando la diversidad de reactivos y productos. Los coeficientes estequiométricos a y b para ajustar la ecuación química dando cumplimiento a la ley de conservación de la materia.

La baja densidad de la cascarilla es un factor a considerar en los procesos de combustión para facilitar el transporte y aprovechamiento por unidad de volumen; por lo tanto, la pretratamiento de briquetado permite conseguir cilindros con densidades que oscilan de 360 kg/m<sup>3</sup> a 600 kg/m<sup>3</sup> y poder caloríficos de 15,5 MJ/kg a 16,3 MJ/kg (Quispe et al., 2017). Si se tiene en cuenta que el poder calorífico de la madera seca oscila entre 18,0 y 20,72 MJ/kg, para el caso húmedos se registran valores de 14,4 MJ/kg (Apolinar-Hidalgo, Honorato-Salazar, & Colotl-Hernández, 2017), entonces se puede afirmar que las briquetas serían un excelente sustituto de la madera en sistemas de combustión.

Gráfica 2. Eficiencia en combustión de cascarilla.



**Fuente:** (Mai Thao, Kurisu, & Hanaki, 2011).

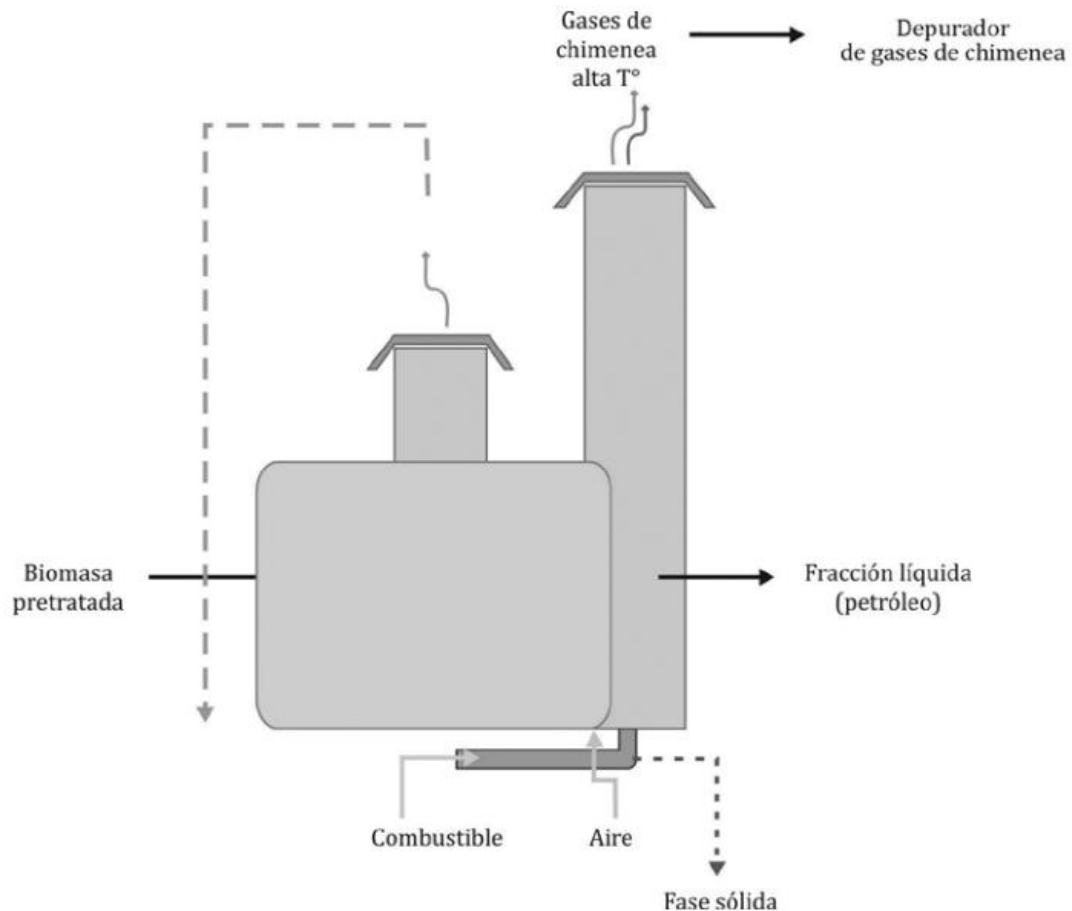
La Gráfica 2 muestra la eficiencia en combustión de cascarilla comparada con madera, para dos tipos de tecnología: turbina de vapor y máquina de vapor. Para capacidades inferiores a 1 MW la combustión de madera acoplada a turbina de vapor para la producción de energía eléctrica presenta una eficiencia de aproximadamente 10%, en contraste, la cascarilla de arroz con tecnología de

maquina de vapor tiene eficiencias inferiores al 10%. A capacidades superiores a 35 MW la eficiencia de la combustión de cascarilla de arroz es superior que su homologa de madera, mostrando que centrales termoeléctricas de cascarilla son una opción eficiente y competente.

#### 5.2.1.1.3. Gasificación

La gasificación es un tipo de tratamiento termoquímico de combustión parcial en deficiencia de aire, para favorecer la producción de compuestos incompletamente oxidados como monóxido de carbono y otros gases como hidrógeno, metano y compuestos orgánicos de cadena corta (Rodríguez Salcedo et al., 2013). El gas pobre llamado así por su bajo poder calorífico es quemado en un motor de combustión especializado que transforma la energía química en energía mecánica; posteriormente un generador eléctrico finaliza el proceso transformándola en energía eléctrica. En la Figura 17 se ilustra un dispositivo de gasificación. La Figura 18 se muestra un dispositivo de gasificación de cascarilla de arroz realizado en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín - CARTIF.

Figura 17. Esquema de un dispositivo de gasificación.



**Fuente:** (Rodríguez Salcedo et al., 2013).

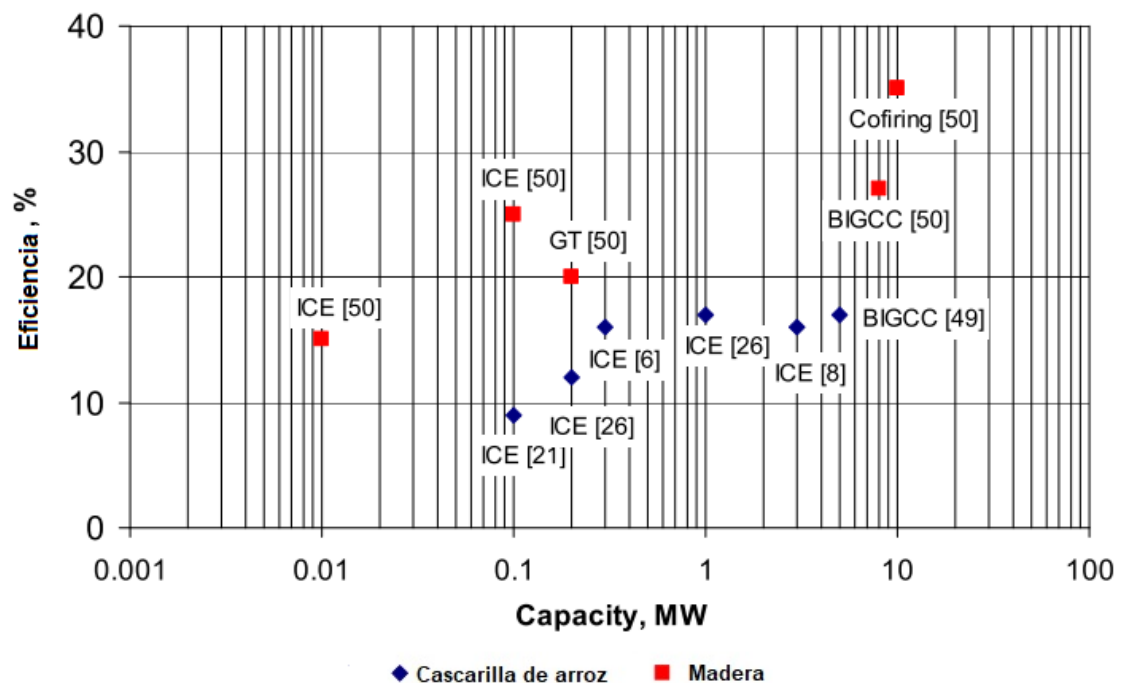


Figura 18. Planta piloto de gasificación en la Universidad Nacional de Colombia.



**Fuente:** Proyecto hibreelec. a) Reactor de gasificación, b) ciclón para gases y c) motor de combustión y generador eléctrico.

Gráfica 3. Eficiencia en gasificación de cascarilla.



ICE: Motor de combustión interna ; BIGCC: Gasificación de biomasa de ciclo combinado ; GT: Turbina de gas

**Fuente:** (Mai Thao et al., 2011).

La Gráfica 3 compara los procesos de gasificación en madera y cascarilla de arroz con tres tecnologías para la producción de energía eléctrica. En todos los casos la gasificación de madera tiene eficiencias mayores comparada con la cascarilla de arroz. Vale la pena señalar que el desarrollo tecnológico de gasificación de cascarilla lleva menos tiempo que su homólogo de madera, por lo tanto, aún es objeto de investigación las mejoras y aumento en la eficiencia de gasificación de cascarilla.

Los procesos de gasificación son ampliamente usados a nivel mundial, sin embargo, las plantas con capacidades de 20 a 400 kWe son escasas. Los gasificadores constan de un sistema de almacenamiento y secado de la cascarilla y el equipo generador; las principales configuraciones usadas son sistemas de tipo: corriente arriba (up-draft), corriente abajo (down-draft) y lechos fluidizados (Prasara-A & Gheewala, 2017).

#### *5.2.1.1.4. Carbonización hidrotérmica*

Es un tipo de conversión termoquímica que utiliza agua en condiciones subcríticas para transformar biomasa húmeda o seca en productos carbonosos mediante el fraccionamiento de la materia prima (Jain, Balasubramanian, & Srinivasan, 2016). En función de las condiciones de temperatura, presión y composición química de la biomasa se obtienen unos porcentajes determinados de biogas (syngas), biocarbón (biochar) y bioaceite (bio-oil) (Cha et al., 2016). La carbonización es también conocida con una pirolisis lenta en ausencia de oxígeno, donde se produce una mayor cantidad de producto sólido, es decir, carbono orgánico.

La cascarilla de arroz puede ser transformada en condiciones de carbonización hidrotérmica, obteniéndose biocarbón y otros subproductos de interés económico (Unrean, Lai Fui, Rianawati, & Acda, 2018).

#### **5.2.1.2. Procesos bioquímicos**

##### *5.2.1.2.1. Fermentación aeróbica*

El alto contenido de lignina y ceniza hace de la cascarilla de arroz una sustancia de lenta biodegradación, precisamente por la naturaleza de su función biológica de proteger el grano. Teniendo en cuenta que la cascarilla contiene 39,65% y 24,5% de celulosa y hemicelulosa (Marrugo et al., 2016), respectivamente; la lignina genera una red alrededor de esta con el fin de prevenir la descomposición enzimática de los homopolímeros de la glucosa. Por lo tanto, los pretratamiento de la biomasa lignocelulósica son indispensables para la posterior transformación en etanol, dentro de estos se encuentran de tipo: físico, fisicoquímico, químico y biológico (Gaurav, Sivasankari, Kiran, Ninawe, & Selvin, 2017).

Dentro de los tratamientos químicos se destacan el uso ácido sulfúrico diluido, dióxido de azufre, soluciones acuosas de amoníaco, hidróxido de sodio, entre

otros, con el objeto de aumentar el área superficial de la cascarilla disolver el silicio enlazado con sacáridos, disolver hemicelulosa, disminuir la cristalinidad y/o parte de la lignina (Lim, Abdul Manan, Wan Alwi, & Hashim, 2012). Posterior a este tipo de tratamiento previa neutralización o acondicionamiento de la biomasa puede utilizarse enzimas con el fin de hidrolizar los homopolímeros de la glucosa, para facilitar la transformación aeróbica con el uso de levaduras, tal como lo indica Gaurav et al. (2017) en su revisión bibliográfica.

Tratamientos físicos como explosión de vapor a temperaturas de 180°C a 230°C (Wood et al., 2016), permiten la liberación de azúcares fermentables con levaduras. También se ha utilizado la extracción con fluidos subcríticos para incrementar la producción de etanol vía fermentación aeróbica. Es claro que todos estos pretratamientos son una estrategia importante en la producción de alcohol etílico con la ventaja clara que el uso de cascarilla de arroz no implica afectación a la seguridad alimentaria. Sin embargo, es necesario indicar que todos ellos incrementan considerablemente los costos en la transformación y aprovechamiento de la cascarilla.

#### 5.2.1.2.2. *Fermentación anaeróbica*

Algunos autores reportan que tanto para procesos de fermentación aeróbica el tamo o paja de arroz es más fácil de pretratar y arroja un rendimiento mayor en producción de bioetanol como lo indica Wood (2016). Para el caso de la fermentación anaeróbica ocurre algo semejante, puesto que la paja de arroz presenta una mayor producción de metano (Contreras, Schelle, Sebrango, & Pereda, 2012); concluyendo que la cascarilla de arroz no es un sustrato apropiado para la biodegradación anaeróbica, indicando que posiblemente este comportamiento está relacionado con el contenido de lignina, asunto que debe ser sujeto a investigación para encontrar evidencia concluyente. La baja biodegradación anaeróbica queda en evidencia en una revisión de literatura sobre mejoramiento de producción de metano de biomasa publicada en el 2019; donde no se menciona el uso de cascarilla de arroz como sustrato y los trabajos relacionados se enfocan exclusivamente en paja de arroz con el uso de hongos como *pleurothus ostreatus* y *fusarium oxysporum* como pretratamiento (Yue Li, Chen, & Wu, 2019).

En Colombia se han realizado investigaciones de aprovechamiento de paja de arroz mezclado con estiércol de vaca y rumen, obteniéndose producciones de 410 L/kg, conversiones del 70% a temperaturas de 25° a 27°C por 60 días (Candia-García et al., 2018). Es importante resaltar que la paja de arroz no se recolecta durante la cosecha, pues las combinadas seleccionan el paddy y devuelve al suelo la paja. Colectar la paja implica una operación adicional que incrementa costos, aunado a la baja densidad de la paja demandando de procesos de compactación para facilitar el transporte.

### 5.2.2. Síntesis de biomateriales

Desde hace varios años el aprovechamiento de la ceniza de cascarilla producto de las transformaciones termoquímicas, ha sido estudiado por los investigadores a nivel mundial, especialmente por aquellos de nacionalidad de los principales países productores como: China, India e Indonesia. En este campo se destacan tres artículos de revisión de literatura publicada en importantes revistas; el primero fue publicado en el año 2003 por Chandrasekhar et al., el segundo en el año 2015 por Soltani et al., el último recientemente publicado en el año 2019 por Dizaji et al. Lo cual es una evidencia de la importancia y dinamismo del tema.

A nivel nacional Ahumada y Rodríguez estudiaron la síntesis de silicatos de calcio, a través de la técnica de precipitación selectiva, donde controlaron parámetros de reacción, propiedades fisicoquímicas y condiciones de reacción; esta investigación resalta pues a partir de transformaciones químicas se obtiene una sustancia de interés comercial como lo son los silicatos de calcio, dándole valor agregado al producto obtenido vía calcinación previa de la cascarilla de arroz (Ahumada & Rodríguez-Páez, 2006).

La ceniza de cascarilla de arroz puede ser utilizada como material puzolánico, mezclándose con cemento para la preparación de morteros estructurales. Camargo y colaboradores reportaron que la sustitución de cemento por 5% de ceniza de arroz calcinada a 800 °C, es una formulación viable manteniendo la resistencia a la compresión y flexión, con respecto al mortero de referencia (Camargo Pérez & Higuera Sandoval, 2017). La producción de cemento es un proceso de alto horno cuyos aspectos ambientales son negativos en el medio, reemplazarlo por sílice amorfa producida por combustión de cascarilla de arroz, puede reducir la huella ambiental de las obras civiles.

Acerca de investigaciones sobre usos de cascarilla y sus derivados, como material avanzado se destacan investigaciones donde se obtiene carbón activado con áreas superiores a 1700 m<sup>2</sup>/g vía activación con ácido ortofosfórico posterior calcinación a 500 °C. El residuo acuoso obtenido del método anterior contiene hemicelulosa, la cual fue hidrolizada para obtener xilosa, se destaca esta investigación por el aprovechamiento exhaustivo de la cascarilla (Ying Li et al., 2011). En la dirección de aprovechamiento exhaustivo de la cascarilla de arroz Zhang y colaboradores (Zhang et al., 2015) proponen realizar un tratamiento de extracción con 1,4-butanidiol posterior hidrólisis ácida para obtener lignina solubilizada y un residuo sólido que se calcina para obtener sílice amorfa.

La cascarilla de arroz activada con fosfatos y calcinada ha sido utilizada eficientemente para remover iones Cd(II), Ni(II) (15) y Zn(II) (Srivastava, Mall, & Mishra, 2007); Rocha y colaboradores (Rocha, Morozin Zaia, da Silva Alfaya, & da Silva Alfaya, 2009) estudiaron la remoción de Cu(II), Zn(II), Cd(II) y Hg(II) usando como adsorbente paja de arroz químicamente tratada. La remoción de iones arsenito con derivados de la cascarilla de arroz fue estudiada por Khan y colaboradores (Khan, Ab Whahap, & Chaudhuri, 2012) encontrando más eficiencia de

remoción que la alúmina la cual es el adsorbente empleado usualmente para la remoción de iones arsenito en medio acuoso. Adsorbentes derivados de la cascarilla de arroz son usados eficientemente en la remoción de colorantes orgánicos en medio acuoso, se ha estudiado la remoción de colorante rojo directo (DR23) (Abdelwahab, El Nemr, El-Sikaily, & Khaled, 2005), rojo congo (Han et al., 2008) y verde de malaquita (Leng et al., 2015).

Otro uso de la ceniza de cascarilla de arroz es en operaciones de filtración para procesos industriales farmacéuticos, petroquímicos, agroindustriales, entre otros. Las tierras diatomeas (Reif Acherman, Blanco Silva, & Arbóleda Villanueva, 2010) y la perlita son sólidos adsorbentes ampliamente usados a nivel mundial como ayudas filtrantes, de igual manera puede usarse las cenizas de cascarilla (Cardoso Manique, Schmitt Faccini, Onorevoli, Benvenuti, & Bastos Caramao, 2012). El uso como ayuda filtrante en procesos industriales farmacéuticos, petroquímicos, agroindustriales, síntesis de biodiesel (Manique, Faccini, Onorevoli, Benvenuti, & Caramão, 2012) y mezclada con tierras diatomeas para la clarificación de cerveza, son de especial interés. Colombia país productor de arroz podría producir este tipo de materiales a partir de cascarilla de arroz, sin embargo, esta situación no es aprovechada en nuestra nación y la demanda de estos sólidos es cubierta vía importación.

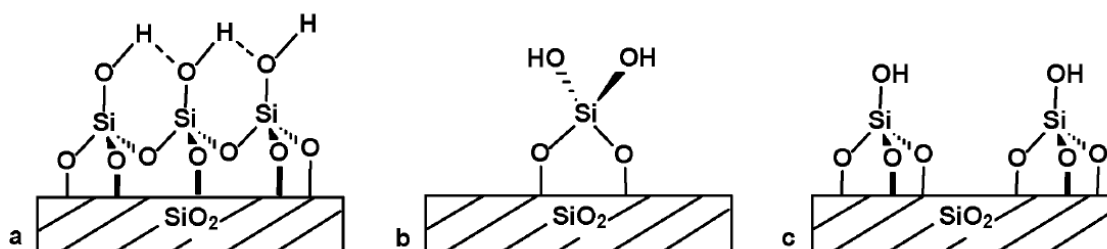
Dentro de las aplicaciones como material avanzado se resaltan la síntesis de catalizadores, zeolitas (Adam, Appaturi, & Iqbal, 2012), carburo de silicio, silicio grado electrónico, siliciuro de magnesio, nitruro de silicio (Soltani et al., 2015), soporte para nanopartículas de plata (Davarpanah & Kiasat, 2013; He, Ikeda-Ohno, Boland, & Waite, 2013), aditivo para la industria de polímeros (Cardona Uribe, Arenas Echeverri, Batancur, Jaramillo, & Martínez, 2018), entre otros.

La sílice precipitada es un material de gran interés tecnológico en diversos sectores productivos. La demanda de estos productos es importante en nuestro país, en especial para los sectores de las industrias de alimentos, farmacéutica y polímeros. Es necesario mencionar que los procesos de producción de sílice a nivel industrial tienen una elevada huella ambiental (Drummond, McCann, & Patwardhan, 2014), la producción de una tonelada, emite 0,23 toneladas de dióxido de carbono, consume 0,74 toneladas de sulfato de sodio y se genera 20 toneladas de agua residual, entre otros (Beidaghy Dizaji et al., 2019). Por lo tanto, la producción de sílice amorfa biogénica a partir de cascarilla de arroz, con propiedades fisicoquímicas semejantes a la sílice precipitada, no solamente es tecnológicamente viable (Ahmed, Nizami, & Riza, 2014; Cardona Uribe et al., 2018; Da Costa, Visconte, Nunes, & Furtado, 2003; Pongdong, Kummerlöwe, Vennemann, Thitithammawong, & Nakason, 2016), también es una alternativa sostenible, económicamente rentable y una oportunidad de sumar esfuerzos hacia la constitución de industrias basadas en nanotecnología.

### 5.2.3. Pretratamientos y catálisis en cascarilla de arroz para la síntesis de sílice amorfa nanoparticulada

La sílice amorfa es una de las sustancias de mayor interés tecnológico que puede obtenerse de la ceniza de cascarilla; es un compuesto con características químicas y superficiales, como distribución de tamaño de poro, superficie químicamente heterogénea y elevada área. Contiene tres diferentes tipos de grupos funcionales silanoles, que le confieren alta actividad química, a saber: vicinales, germinales y aislados (Dijkstra, Duchateau, Van Santen, Meetsma, & Yap, 2002, p. 2), como se muestran en la Figura 19 la distribución de estos grupos químicos en la superficie de la sílice depende de la temperatura, de tal manera que al someterse a valores altos, se generan preferiblemente otros arreglos moleculares de la sílice conocidos como siloxanos (Adam et al., 2012) y formas cristalinas de sílice (Swamy, Saxena, Sundman, & Zhang, 1994), todas ellas con baja reactividad química.

Figura 19. Tipos de silanoles superficiales en sílica.

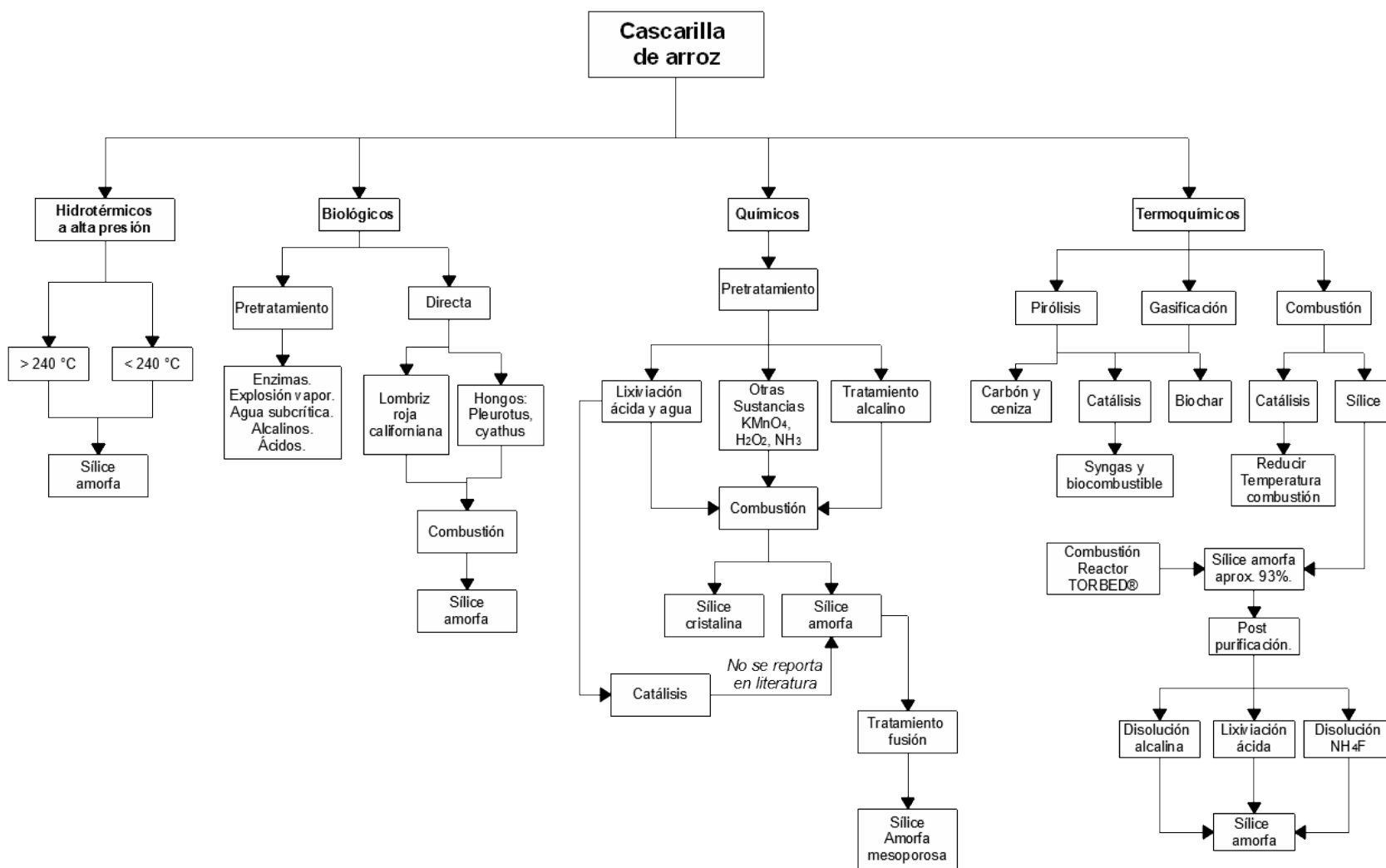


**Fuente:** Tomado de (Dijkstra et al., 2002, p. 1). En la figura: (a) Silanoles vicinales, (b) silanoles geminales, y (c) silanoles aislados; estos últimos son los que presentan mayor actividad química.

Los métodos termoquímicos son una forma eficiente y muy utilizada para obtener la sílice [62], con el limitante fenómeno de sinterización (Bakar, Yahya, & Gan, 2016); la gasificación ha sido eficientemente probada en Colombia, generándose un prototipo híbrido con celdas solares a escala piloto (Asprilla, Valdés, Macías, & Chejne, 2018). En contraste, la pirólisis no es una alternativa recomendable para la cascarilla ya que la cantidad de compuestos volátiles no es la apropiada (Marrugo et al., 2016). La mayoría de autores en la literatura científica coinciden en que la combustión es el proceso más indicado para la transformación de cascarilla de arroz (Abaide, Tres, Zobot, & Mazutti, 2019; Blissett, Sommerville, Rowson, Jones, & Laughlin, 2017; Marrugo et al., 2016; Soltani et al., 2015), encontrándose en avanzado estado de madurez y con tecnologías comerciales consolidadas; tal es el caso del sistema TORBED® con el que se puede lograr temperaturas de 700 °C a 950 °C, obteniéndose sílice amorfa con áreas superficiales de 45 a 5 m<sup>2</sup>/g (Blissett et al., 2017), a pesar del avance persiste la problemática acerca de: ¿cómo obtener sílice amorfa nanoparticulada de alta área superficial?

La materia orgánica también puede ser removida de la cascarilla con tratamientos biológicos. El *pleurotus ostreatus* (Beg, Zafar, & Shah, 1986), *cyathus* (Rohatgi, Prasad, & Rohatgi, 1987) y *fusarium oxysporum* (Bansal, Ahmad, & Sastry, 2006) han sido empleados con el objeto de biodegradar la cascarilla de arroz, incrementar la fracción inorgánica y obtener sílice amorfa. La lombriz californiana roja ha sido utilizada con relativo éxito para biodegradar la cascarilla y obtener sílice (Estevez, Vargas, Castaño, & Rodriguez, 2009). Entre los tratamientos microbiológicos aeróbicos se destaca la fermentación de cascarilla de arroz para la obtención de etanol (Gaurav et al., 2017), sin embargo, dadas las características químicas de la cascarilla y su resistencia a la biodegradación son necesarios pretratamientos con enzimas (Piñeros-Castro et al., 2011), con ácidos (Megawati, Sediawan, Sulisto, & Hidayat, 2011), hidróxidos (Ang, Ngoh, & May Chua, 2013), explosión de vapor (Wood et al., 2016) y fluidos subcríticos (Abaide, Mortari, et al., 2019; Abaide, Tres, et al., 2019; Abaide, Ugalde, et al., 2019), para poder hidrolizar celulosa y hemicelulosa en azúcares fermentables. Se ha reportado que en la biodegradación anaeróbica de cascarilla los rendimientos en generación de biogás son muy bajos (Contreras et al., 2012), en ese sentido, la paja de arroz se biodegrada más eficientemente, generando hasta 410 L/kg de sólidos volátiles (Candia-García et al., 2018). Con el objeto de incrementar la producción de biogás se pueden realizar pretratamientos con *Pleurotus ostreatus* y *Trichoderma reesei* (Mustafa, Poulsen, & Sheng, 2016).

Figura 20. Pretratamiento en cascarilla para la síntesis de materiales avanzados.



**Fuente:** Tratamiento en cascarilla para obtener sílice amorfa, tomado y adaptado de (Cardona Uribe et al., 2018; Soltani et al., 2015)



Producto de la revisión de la literatura, se encontraron muy pocos trabajos en combustión catalizada de cascarilla, puntualmente aquellos que impliquen pretratamiento ácido catálisis combustión, como puede evidenciarse en tres de las principales revisiones publicadas en los años 2003, 2015 y 2019 (Beidaghy Dizaji et al., 2019; Chandrasekhar, Satyanarayana, Pramada, Raghavan, & Gupta, 2003; Soltani et al., 2015). El autor ha realizado pruebas preliminares donde se evidencia el efecto catalítico de especies metálicas en cascarilla reduciendo temperatura de combustión y obteniéndose cenizas blancas sin material carbonoso.

Dentro del proceso térmico de combustión la sinterización reduce notablemente la actividad química de sílice amorfa, esta se puede evitar, si previamente se realiza lixiviación ácida a la cascarilla (Chakraverty, Mishra, & Banerjee, 1988), para remover los iones metálicos, lo cual incrementa la pureza de la sílice obtenida y evita la formación de eutécticos a bajas temperaturas. El pretratamiento ácido es un proceso ampliamente usado en la producción de ceniza de cascarilla de alto contenido de sílice amorfa (Adam et al., 2012, p. 4; Bakar et al., 2016; Chakraverty et al., 1988; Chandrasekhar, Pramada, & Praveen, 2005; Liu, Zhang, Han, Xie, & Wu, 2013); a cambio de eliminar impurezas, la temperatura de combustión de la materia orgánica presente en la cascarilla incrementa (Megawati et al., 2011) y en consecuencia se obtiene sílice cristalina. Un estudio sistemático acerca de los efectos de tratamientos ácidos es reportado por Chakraverty et al, los resultados se muestran en la Tabla siguiente:

Tabla 7. Lixiviación de especies iónicas en cascarilla.

Tratamientos	Constituyentes metálicos como óxidos (ppm)								
	Na	K	Ca	Fe	Mg	Mn	Zn	Cu	Total
Sin tratamiento	5125	11750	7042	946	2562	1192	179	31	28827
HCl 1 M	46	50	58	362	187	19	19	6	747
HCl 3 M	33	33	46	262	146	7	19	6	552
HCl 5 M	25	ND	25	146	125	3	19	6	349
HCl 11,3 M	12	ND	8	129	125	3	17	6	300
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1 M	87	25	2500	233	729	25	102	102	3713
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 4,5 M	92	25	2417	225	646	25	98	6	3534
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 9 M	75	25	2500	229	625	19	85	6	3564
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 18 M	75	50	2667	217	625	24	83	6	3747
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 36 M	117	100	3333	221	437	171	98	6	4483
HNO <sub>3</sub> 4,5 M	17	25	19	500	83	19	17	8	688
HNO <sub>3</sub> 9 M	8	25	11	442	83	12	12	6	559
HNO <sub>3</sub> 18 M	4	25	7	392	62	6	12	ND	496
HCl 1 M + HNO <sub>3</sub> 4,5 M	4	25	3	375	52	12	19	6	496

**Fuente:** Efecto de tratamiento de lixiviación ácida en cascarilla de arroz, (ND= no detectable), tomado de (Chakraverty et al., 1988).

El ácido clorhídrico presenta una alta remoción de especies metálicas, mezclas de HCl 1 M y HNO<sub>3</sub> 4,5 M dan lugar a remociones óptimas. También ácidos orgánicos como pretratamiento de la cascarilla de arroz como: acético, oxálico y cítrico (Liou & Yang, 2011) han sido utilizados con el fin de remover especies metálicas; con el mismo propósito, posterior a la combustión se utilizó ácido cítrico sólido para ser mezclado con la cenizas de cascarilla para incrementar el área superficial de la sílice amorfa (Azat, Korobeinyk, Moustakas, & Inglezakis, 2019). Sin embargo, los ácidos minerales son más eficientes en el pretratamiento de lixiviación (Soltani et al., 2015).

Las propiedades de la sílice amorfa obtenida vía combustión de cascarilla tratada con ácido, dependen fuertemente de la temperatura de calcinación (Liangming Xiong, Seia, Sujaridworaun, Wada, & Saito, 2009). Se reporta que para temperaturas de calcinación superiores a 850°C se forma espontáneamente cristobalita (Markovska & Lyubchev, 2007). El diagrama de fases del óxido de silicio muestra que, a temperaturas superiores a los 800 °C, predominan las fases cristalinas, como las tridimita,  $\alpha$ -cuarcita y  $\beta$ -cuarcita (Swamy et al., 1994). Las formas cristalinas del óxido de silicio presentan muy baja área superficial, no hay porosidad apreciable y su reactividad es muy baja, contrario a la sílice amorfa nanoparticulada (Chandrasekhar et al., 2003).

Si no se retiran las especies iónicas de cascarilla de arroz, las cenizas producidas por combustión generarían sílice sinterizada de baja pureza, pero este pretratamiento también incrementa la temperatura de combustión, pues se retiran especies como el manganeso que tiene actividad catalítica en la combustión (L. Xiong, Saito, Sekiya, Sujaridworakun, & Wada, 2009; Liangming Xiong, Sekiya, Wada, & Saito, 2009). Entonces, luego de la lixiviación es necesario adicionar un catalizador, que disminuya la temperatura de combustión, asegurando que no se produzcan fases cristalinas y que la superficie de la sílice amorfa nanoparticulada tenga una elevada distribución de grupos silanoles.

Algunos estudios indican que la presencia de manganeso, calcio, magnesio, hierro, fósforo y cobre en la cascarilla de arroz cruda hace que la energía de activación de la combustión sea menor con respecto a la misma energía de la cascarilla tratada por lixiviación ácida (Liangming Xiong, Saito, Sekita, Sujaridworaun, & Wada, 2009; Zhaosheng, Xiaoqian, & Ao, 2008). Xiong y colaboradores encontraron que el manganeso puede reducir la temperatura de combustión de cascarilla en 100 °C con respecto a la cascarilla sometida a lixiviación ácida; sin embargo, no se presenta una caracterización de la sílice obtenida en este trabajo, pero queda abierta la posibilidad de seguir investigando el posible efecto catalítico de otros metales de transición (Liangming Xiong, Sekiya, et al., 2009) y determinar las características fisicoquímicas de la sílice preparada.

La combustión catalizada de paja de arroz y trigo se ha estudiado con los óxidos de cobre, níquel, magnesio y calcio, en flujo de aire y atmósfera enriquecida en oxígeno. Se mezclaron los catalizadores a concentraciones de 1, 2 y 3% con las pajillas trituradas, para ser analizadas en TGA-DSC desde temperatura ambiente hasta 950 K, con una rampa de 30 K/min y un flujo de aire de 100 mL/min (Zhaosheng et al., 2008). Los autores dividieron el proceso de combustión en dos fases; una que corresponde a la oxidación de materia orgánica volátil de 200 °C a 300 °C y otra de oxidación de carbono fijo a temperaturas superiores a 700 °C. La siguiente tabla resume los resultados obtenidos por Zhaosheng y colaboradores.

Tabla 8. Efecto de impregnación con óxidos metálicos en combustión de cascarilla y paja de arroz.

Fluido	Biomasa	Fases	1	2	3	4
Atmósfera aire	Paja de arroz	200 a 300 °C	MgO	CaO	CuO	NiO
		>700 °C	CaO	NiO	CuO	MgO
	Paja de trigo	200 a 300 °C	MgO	NiO	CaO	CuO
		>700 °C	MgO	NiO	CuO	CaO
Atmósfera enriquecida en oxígeno	Paja de arroz	200 a 300 °C	CuO	NiO	CaO	MgO
		>700 °C	MgO	NiO	CuO	CaO
	Paja de trigo	200 a 300 °C	CaO	MgO	CuO	NiO
		>700 °C	CaO	MgO	CuO	NiO

**Fuente:** Elaboración propia a partir de información en la literatura (Zhaosheng et al., 2008).

De acuerdo con la tabla 2, en la combustión de materia orgánica volátil el óxido de magnesio es el más activo y en la oxidación de carbono fijo el óxido de calcio. En atmósfera enriquecida en oxígeno, los compuestos más activos son el CuO y MgO, para las dos fases de combustión, respectivamente. Es importante resaltar que los autores realizan un estudio cinético de la combustión catalítica, pero no se estudian los efectos de los tratamientos sobre las propiedades fisicoquímicas de la sílice amorfa que se obtiene en la incineración, más aún cuando el magnesio y calcio pueden participar en procesos de sinterización con la sílice a altas temperaturas.

La impregnación de acetato de manganeso en concentraciones de 0,01, 0,05, 0,1 y 0,5 M en cascarilla de arroz lixiviada por vía ácida, se reduce la temperatura de combustión aproximadamente en 100 °C con respecto a la de cascarilla sin impregnar. Es claro el efecto catalítico que tiene el manganeso en la combustión (Liangming Xiong, Sekiya, et al., 2009), hecho que facilitaría un proceso a gran

escala, permitiendo aprovechar la energía térmica de la cascarilla y obteniendo finalmente sílice amorfa nanoparticulada. Sin embargo, el importante trabajo llevado a cabo por Xiong y colaboradores deja abiertas las puertas a seguir investigando en el efecto de catalítico de otros metales, como hierro, cobre, cinc, magnesio, calcio, cobalto y plata, y, mejorar las condiciones de impregnación.

## **6. ASPECTOS AMBIENTALES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ**

La humanidad se enfrenta a grandes retos a nivel ambiental, que bien pueden ser abordadas en formas de problemáticas que amenazan su bienestar y supervivencia como especie. Dentro de las ya mencionadas problemáticas se destacan: la pérdida de biodiversidad, pérdida de calidad del suelo e incremento de la desertificación, contaminación del agua, aire y suelo, sobrecarga de los ecosistemas, lluvia ácida y calentamiento global, entre otros (Arellano Díaz, 2002; Baird & Cann, 2012; Mihelcic & Zimmerman, 2012).

Las estrategias que apuestan a la educación ambiental, a la generación de competencias que hagan del hombre un ser consciente que incorpore la variable ambiental en todas las decisiones trascendentales de su interacción con la naturaleza, son una solución importante a las problemáticas ambientales (Pita-Morales, 2016). Es necesario el desarrollo de una ética ambiental (Vega-Marcote & Álvarez-Suárez, 2005), de una conciencia verde que modere las acciones del ser humano, que incentiven su autonomía y le permitan tomar un rol activo frente a las estrategias de consumo que plagan todos los medios de comunicación.

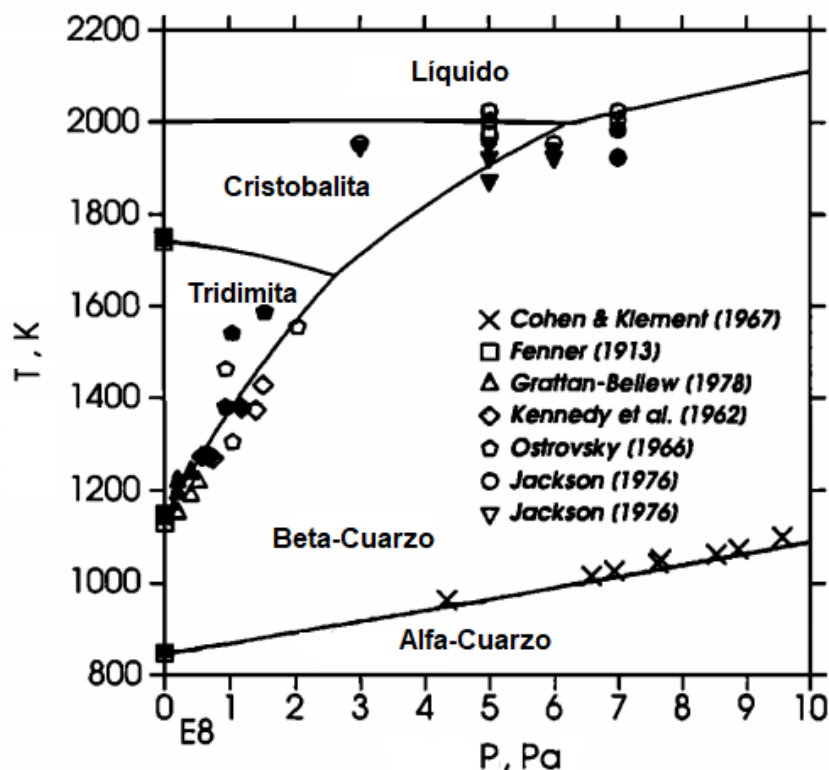
Precisamente la conciencia ambiental y la preocupación generalizada de los principales actores académicos, políticos y sociales, frente a los problemas ambientales han llevado a hablar de desarrollo sostenible desde hace varios años. Celebrando importantes cumbres y acuerdos que permitan hacer frente al desafío ambiental; tan publicitado ha sido esta coyuntura, que hasta se ha abierto un nuevo segmento de mercado, para compradores preocupados y comprometidos con la sostenibilidad. Análisis de ciclo de vida, huella hídrica, huella de carbono, entre otros, son variables determinadas y de conocimiento público para muchas actividades productivas.

En ese sentido, el análisis de la huella ambiental asociada específicamente a la generación de cascarilla de arroz es el objetivo principal de este capítulo. Claramente para hacer un análisis de ciclo de vida (ACV) debería empezarse desde la producción de todos los insumos agropecuarios, uso de maquinaria, tipo de suelo sembrado, distancias a los puntos de acopio, entre otros; todo lo anterior imposibilita realizar un ACV para la producción de cascarilla de arroz, contrastando con el hecho que la siembra de arroz se hace con el objetivo principal de obtener el grano de este importante cereal y tanto la cascarilla como el tamo son subproductos. Por lo anterior, el análisis se limitará a la producción de cascarilla en los principales generadores de esta, los molinos.

Aunque ya no es una práctica generalizada, la cascarilla solía quemarse en grandes extensiones de tierra con el fin de devolver algunos nutrientes al suelo, hecho que genera gases efecto invernadero como  $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ , que a su vez participan en la formación de lluvia ácida (Maslin, 2008). De igual manera, el proceso de combustión genera micropartículas de carbón, también conocidas como hollín, los aspectos e impactos asociados a esta, van desde enfermedades respiratorias hasta en casos crónicos, cáncer (Triana Novoa, 2010).

La combustión a temperaturas elevadas de cascarilla, genera ceniza en tamaño de partícula ultrafino (tamaño de partícula de 100 hasta 1000 nm) (Rodríguez Baracaldo, Benito, & Cabrera, 2010) es potencialmente peligrosa para la salud; compuesta por formas cristalinas de sílice como: cristobalita, cuarcita y asbestos, que al ser respirados pueden tener efectos carcinogénicos y de bioacumulación, generando silicosis, fatiga, pérdida del apetito y fallas respiratorias (Mor et al., 2017; Pode, 2016). La Figura 21 muestra como las fases cristalinas a condiciones normales de presión predominan en la combustión de cascarilla de arroz, la cuales dadas sus características fisicoquímicas pueden llegar a ser tan peligrosas como los asbestos, que sea de paso dicho es una fase cristalina de la sílice.

Figura 21. Diagrama de fase de la sílice.



**Fuente:** Tomado y adaptado de (Swamy et al., 1994).

Otra práctica generalizada que poco a poco se ha reducido es la disposición de la cascarilla en lotes vacíos, situación que dada la baja biodegradabilidad de la cascarilla modifica la dinámica natural del suelo (Doménech, 2000). Ya que el intercambio de gases, microorganismos, agua y temperatura se alteran completamente. Por otro lado, procesos anaeróbicos de biodegradación que en pequeña medida pueden darse producen metano (Candia-García et al., 2018), un gas que tiene un efecto como gas invernadero cuarenta veces más potente que el dióxido de carbono (Maslin, 2008). Los residuos de cascarilla de arroz deben gestionarse y tratarse apropiadamente, en mayor medida sabiéndose de antemano que se producen anualmente solo en el departamento de Casanare 170.000 toneladas de cascarilla de arroz.

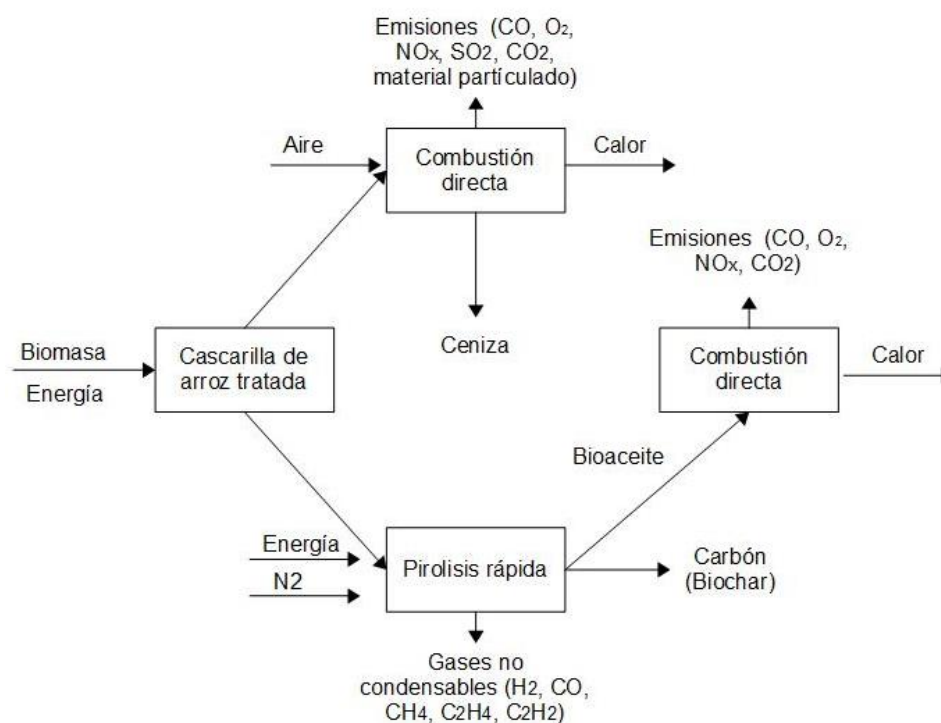
Como ya se había mencionado en el numeral 5.1.4.1 sobre uso de cascarilla como material de secado y cama para animales, el residuo de esta práctica es cascarilla contaminada con heces de animales. Lo anterior no solamente implica un riesgo biológico, también es un reactivo apropiado para que la actividad microbiológica pueda dar lugar a la producción más acentuada de gases de efecto invernadero. También es necesario indicar que, junto a lo anterior, la proliferación de vectores y roedores es una consecuencia de la incorrecta disposición de la cascarilla con heces. A la fecha no se conocen de estudios de los impactos asociados a la gestión inapropiada de este importante subproducto agrícola, ya que las principales naciones productoras aprovechan este material y lo incorporan a su cadena productiva.

Los procesos termoquímicos han sido estudiados en cuanto a su huella ambiental, es importante destacar que las emisiones de gases y contaminantes depende fuertemente de la tecnología empleada. En la Figura 22 se ilustra las transformaciones hechas sobre cascarilla de arroz en los procesos térmicos de combustión y pirolisis, donde se indican los reactivos y productos de cada uno de estos. Hay que destacar que en la pirolisis los productos son gases no condensables y bioaceite, posteriormente estos pueden ser sometidos a combustión, la cual también emite gases; otro subproducto importante es el biochar o carbón, que puede ser usado como material de relleno en algunas aplicaciones industriales. Ya se había advertido que la pirolisis requiere de energía, que bien puede ser obtenida de los gases no condensables producidos sometidos a combustión.

En la combustión se obtiene cenizas, calor y gases de emisión como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{SO}_2$ ; la generación de monóxido y dióxido depende de la disponibilidad de oxígeno, en deficiencia se produce el primer compuesto y en exceso el otro (Triana Novoa, 2010). Es importante destacar que el monóxido de carbono es bien conocido por su alta toxicidad en seres vivos, ya que su semejanza con el oxígeno y su mayor

electronegatividad acompleja irreversiblemente la hemoglobina, encargada de transportar el oxígeno al interior de la células (Peña, Carte, & Ayala Fierro, 2001).

Figura 22. Conversión de cascarilla por tratamiento térmico.



**Fuente:** Tomado y adaptado de Quispe (2017)

Tabla 9. Producción de gases efecto invernadero por cada fuente de biomasa.

Combustibles	Emisión GEI (kg CO <sub>2</sub> eq /kg) (A)	Poder calorífico (MJ/kg) (B)	(kg CO <sub>2</sub> eq/MJ) (C)
Carbón	2,16	20,7	0,104
Cascarilla de arroz	0,1	14,0	0,007
Briqueta de cascarilla	0,12	16,3	0,008
Diesel	3,24	43,0	0,075

**Fuente:** GEI (Gases efecto invernadero).  $C=A/B$  para normalizar las emisiones y conocer emisión por unidad de energía (Mai Thao et al., 2011).

En la Tabla 9 puede observarse que la emisión de gases de efecto invernadero por la combustión de cascarilla de arroz es menor que la generada por carbón y diesel.



A pesar de que el poder calorífico del diesel y el carbón es superior a la cascarilla, la baja emisión por unidad de masa de esta última hace que la producción de dióxido de carbono por unidad de energía (cuarta columna) sea menor. Las briquetas de cascarilla incrementan el poder calorífico en 2,3 MJ/kg con respecto a la cascarilla sin aglomerar. La baja emisión de este importante subproducto agroindustrial es gracias a que las plantas de arroz fijan carbón y pese a que su poder calorífico es aproximadamente tres veces inferior que el diesel, la emisión de gases por megajulio de energía es 10 veces inferior que la del conocido combustible fósil.

La eficiencia de los procesos térmicos es un aspecto importante para considerar, ya que está directamente relacionado con la cantidad de energía aprovechable y cuanto se pierde en forma de calor a los alrededores. Es claro que la segunda ley de la termodinámica prohíbe una conversión de energía térmica a otros tipos de energía en un 100% (Engel & Reid, 2006). En condiciones favorables los motores de combustión interna manejan eficiencias cercanas al 22%; por otro lado, los motores de Stirling y Erickson presentan eficiencias más altas, pero dadas las condiciones de operación y baja potencia son motivo de investigación científica que pueda hacer viable su aplicación técnica (Çengel & Boles, 2012). La Tabla 10 muestra las eficiencias de los procesos de combustión y gasificación para plantas de diferentes capacidades de producción; comparándose las plantas de 5 MW con respecto a sus homologas de 30 MW, las eficiencias de estas últimas son mayores. Se resalta que la cascarilla aglomerada en forma de briquetas presenta eficiencias de 25%. Lo anterior permite que la biomasa pueda aprovecharse más apropiadamente y reducir la cantidad de emisiones por unidad de energía producida.

Tabla 10. Comparación de eficiencia en combustión y gasificación de cascarilla.

<b>Materia prima</b>	<b>Tecnología</b>	<b>Capacidad (MW)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
Cascarilla de arroz	Combustión	5	15
		30	25
	Gasificación	5	16
		30	30
Briqueta	Combustión	5	25
		30	30

**Fuente:** (Mai Thao et al., 2011)

Tabla 11. Emisión en diferentes tecnologías de lecho fluidizado.

Contaminante	Unidad	Lecho fluidizado de circulación	Lecho de fluidizado de cámara de combustión corta	Lecho fluidizado de combustión de vortex
CO <sub>2</sub>	%	14,1	11,4	-
O <sub>2</sub>	%	3,80	8,77	-
CO	ppm	788	50,00	400
SO <sub>2</sub>	ppm	65	-	80,0
NO <sub>x</sub>	ppm	153	232	220
Carbón en ceniza volante	%	6,50	-	-
Carbón inquemable en ceniza	%	-	0,80	-
Eficiencia de combustión	%	97,3	99,8	-

**Fuente:** (Quispe et al., 2017)

La Tabla 11 muestra las emisiones típicas de tres tipos de tecnologías de combustión; se destaca que las emisiones de monóxido de carbono del sistema de lecho fluidizado de cámara de combustión corta es la menor de las tres tecnologías relacionadas en la tabla, hecho importante considerando la gran toxicidad de este tipo de gas. Sin embargo, la emisión de óxidos nitrogenados es mayor con respecto a las demás. Es importante resaltar que las emisiones de dióxido de azufre y óxidos nitrogenados depende de las características fisicoquímicas de la cascarilla usada. Por lo tanto, no es factible comparar este tipo de emisión entre las diferentes tecnologías. Llama la atención la gran eficiencia de 99,8% en la cámara de combustión corta, mostrando con ello que es una tecnología eficiente y de bajas emisiones. Por último, es necesario señalar que no se encuentran estudios de emisiones de la tecnología TORBED®, con respecto a otras. Esta última tecnología ha mostrado con creces ser eficiente y de alta producción de sílice amorfa, ya que puede operar a temperaturas inferiores a 750°C, lo cual evita la generación de fases cristalinas de sílice en las cenizas, que tienen efecto nocivo a nivel respiratorio en los seres vivos.

La siguiente table muestra las emisiones, emisión de dióxido de azufre y fosfatos en la producción de 1 KWh de energía. Puede evidenciarse que el proceso de producción en el campo y transporte al molino producen 12 veces más gases de efecto invernadero (GEI), que la combustión en central termoeléctrica. Por otro lado, la paja de arroz produce más emisiones que la cascarilla, mostrando con ello que pueden emplearse otras tecnologías con menor huella de carbono como transformación microbiológica, sin embargo, es necesario realizar estudios que permitan determinar las emisiones de este último proceso. Queda claro que la transformación tecnológica de la cascarilla tiene una menor huella ambiental que la gestión inadecuada de la misma; el punto clave de esta situación son los elevados costos de las tecnologías y la adaptación de las comunidades a su uso (Mai Thao et al., 2011; Quispe et al., 2017), por supuesto es motivo de investigación científica para buscar los procesos más apropiados que reduzcan su huella ambiental .

Tabla 12. Huella ambiental de la cascarilla.

<b>Residuo</b>	<b>Sistemas acoplados</b>	<b>GEI kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>Acidificación kg SO<sub>2</sub> eq</b>	<b>Eutroficación kg PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq</b>
Cascarilla de arroz	Solo generación de energía eléctrica	1,70E-02	9,20E-04	3,90E-04
Cascarilla de arroz	Desde molino a generación de energía eléctrica	6,70E-02	No disponible	No disponible
Paja de arroz	Desde molino a generación de energía eléctrica	1,80E-01	No disponible	No disponible
Cascarilla de arroz	Solamente colección y generación de energía eléctrica	0,5E-0,1	No disponible	No disponible
Cascarilla de arroz	Desde el campo a generación de energía eléctrica	2,17E-01	No disponible	No disponible
Paja de arroz	Desde el campo a generación de energía eléctrica	4,3E-1	6,70E-03	1,46E-03

**Fuente:** (Quispe et al., 2017)

## 7. APLICACIONES AMBIENTALES

La gestión eficaz de la cascarilla de arroz y su disposición final sostenible tiene efectos directos sobre el medio ambiente como ya se pudo mostrar en el capítulo anterior. La producción de sílice amorfa y obtención de energía térmica a partir de cascarilla, reduce significativamente la huella ambiental de procesos industriales, que demandan de estos dos recursos, constituyéndose sin lugar a dudas en aplicaciones ambientales en cuanto son estrategias de producción más limpia (Restrepo Gallego, 2006). A groso modo puede clasificarse las aplicaciones ambientales de la transformación tecnológica de la cascarilla en tres importantes categorías: producción más limpia, tratamiento de aguas y suelo.

En la categoría de producción más limpia se destacan los usos en la generación de energía. En el apartado 5.2.1.1. de procesos térmicos, se mostraron las diferentes formas de aprovechamiento energético de la cascarilla, concluyéndose que la combustión es una alternativa eficaz que puede dar lugar a productos de importancia industrial como la sílice amorfa o sílice biogénica, sustancia de amplio uso en la industria de los polímeros. La sílice biogénica puede ingresar en el segmento de mercado relacionado con sustancias de baja huella ambiental o simplemente sílice verde, ya que, si se compara con otros procesos industriales típicos, la huella ambiental es menor. La producción de una tonelada sílice de manera tradicional, emite 0,23 toneladas de dióxido de carbono, consume 0,74 toneladas de sulfato de sodio y se genera 20 toneladas de agua residual, entre otros, indicando el alto impacto de esta actividad industrial (Beidaghy Dizaji et al., 2019).

La producción de xilitol (Ying Li et al., 2011) y obtención de otros azúcares fermentables para la generación de etanol, son procesos asociados a la producción más limpia, donde un subproducto considerado un residuo sin aplicaciones inmediatas, puede ser transformado en un producto de interés comercial. Es importante resaltar que el xilitol es un monosacárido ampliamente usado en la preparación de gomas de mascar; lo anterior implica que es posible preparar sustancias de interés para la industria alimentaria, generando alternativas productivas para la cascarilla, evitando que miles de toneladas sean quemadas o simplemente biodegradadas lentamente, con su correspondiente emisión de gases efecto invernadero.

La producción de bioetanol a partir de desechos agroindustriales, hace parte de las tecnologías de biocombustibles de segunda generación, las cuales evitan la competencia con la producción agrícola para consumo humano, no presentando amenaza alguna a la seguridad alimentaria de las naciones (Rodríguez Salcedo et al., 2013). A lo largo de este documento se ha expuesto con claridad las implicaciones de la baja biodegradabilidad de la cascarilla y el alto contenido de

celulosa-hemicelulosa en esta. La fermentación de materiales con las características propias de la cascarilla exige de pretratamientos; por ejemplo, la hidrólisis con agua subcrítica promueve la ruptura de cadenas de homopolímeros liberando sus respectivos monómeros, que para el caso de la celulosa y hemicelulosa es la glucosa, aprovechable por las diferentes variedades de la *saccharomyces cerevisiae* (Abaide, Ugalde, et al., 2019). El mencionado pretratamiento demanda de temperaturas de pueden oscilar de 180 °C a 260 °C y presiones del orden de 25 MPa (Abaide, Mortari, et al., 2019) dando lugar a la transformación en azúcares fermentables que posteriormente producen bioetanol.

Para tratamientos de suelos la ceniza de cascarilla de arroz ha sido utilizada en la estabilización de los mismos como sustituto o método adicional a otras operaciones típicas como compactación mecánica, deshidratación con agentes químicos, electro-osmosis, geotextiles y columnas de piedras (Otoko, 2014).

La ceniza de cascarilla proveniente de pirolisis es utilizada para el tratamiento en suelos ácidos, disminuyendo la densidad, la resistencia, intercambio de aluminio e hierro soluble, incrementando el pH, la materia orgánica, el fósforo total del suelo, capacidad de intercambio catiónica, potasio y calcio intercambiable (Masulili, Utomo, & Syechfani, 2010)

El tratamiento de aguas contaminadas o residuales puede ser llevado a cabo con cascarilla de arroz a través del método de humedales artificiales, como ya se indicó en el apartado 5.1.4.2 fitorremediación. Lo anterior permite la reducción de la carga orgánica disuelta en agua, convirtiéndose en una metodología valiosa, ya que parte del carbono orgánico disuelto es incorporado directamente a la planta, la cual dependiendo de la especie puede ser utilizado en alimentación animal. El balance es una reducción de la huella de carbono de los tratamientos de agua residual, pues en un proceso aeróbico convencional la mayor parte de la materia orgánica es convertida a dióxido de carbono.

El uso de materiales adsorbentes lignocelulósicos dentro de las tecnologías de tratamiento de agua residual es una importante alternativa, permitiendo emplear residuos agroindustriales o material de poda para dar respuesta a problemáticas de contaminación de efluentes en lugares de remoto acceso. La cascarilla de arroz sin tratamiento como material de tipo lignocelulósico, ha sido empleada para tratar agua residual sintética, removiendo Cr(III) y Cu(II) alcanzando niveles de remoción de 22,5 mg/g y 30 mg/g en un rango de pH de 5 a 6 unidades (Sobhanardakani, Parvizmosaedi, & Olyaie, 2013). Especies contaminantes como Cd(II), Ni(II) y Cr (IV), con remociones de 8,58 mg/g, 102 mg/g y 45,6 mg/g, respectivamente, han sido reportadas en el tratamiento de aguas residuales (Malik, Jain, & Yadav, 2017).

Como ya se había indicado en el apartado 5.2.2 síntesis de biomateriales, donde se exponían diferentes transformaciones hechas en cascarilla para obtener materiales

con características fisicoquímicas especiales; dentro de las aplicaciones ambientales se destaca el incremento de sitios de intercambio iónico vía activación química. Tratamiento a altas temperaturas con ácido fosfórico incrementa sitios activos con capacidad de intercambio catiónico, que permiten la remoción efectiva de iones  $\text{Cd(II)}$ ,  $\text{Ni(II)}$  y  $\text{Zn(II)}$  (Srivastava et al., 2007). De manera semejante la paja de arroz tratada es utilizada para remover de  $\text{Cu(II)}$ ,  $\text{Zn(II)}$ ,  $\text{Cd(II)}$  y  $\text{Hg(II)}$ , todos ellos ampliamente conocidos por su alta toxicidad propia de los metales pesados (Rocha et al., 2009).

## 8. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL DEPARTAMENTO DE CASANARE

Las transformaciones termoquímicas son las que presentan las más elevadas eficiencias y podrían manejar el alto volumen de producción regional, adicionalmente generan energía eléctrica una necesidad importante para el Departamento de Casanare. Dentro de los procesos de combustión directa se ha es bien sabido que la tecnología más eficiente y que produce preferencialmente ceniza rica en sílice amorfa es la tipo TORBED® (Blissett et al., 2017). Sin embargo, otras como pirolisis, digestión anaeróbica con posterior combustión de metano y la carbonización hidrotérmica son alternativas importantes con huellas ambientales bajas (Unrean et al., 2018). Acerca de la pirolisis Marrugo (2016) ya había señalado que dadas las propiedades fisicoquímicas de la cascarilla de arroz y su relación carbono fijo y volátiles no era apropiada, por lo que en un primer acercamiento se descarta; por otro lado, ya se había señalado que los procesos anaeróbicos para generación de metano no son recomendables para la cascarilla de arroz por su baja biodegradabilidad.

De acuerdo a la literatura al compararse la gasificación y la combustión, la última es un proceso más eficiente (Rodríguez Salcedo et al., 2013), ya que la conversión de energía química a energía térmica es directa y no hay pasos intermedios de termólisis en condiciones reductoras, posterior combustión en motor para “gas pobre”, como si ocurre en la gasificación. Por lo tanto, se propone la alternativa de usar la tecnología TORBED (Blissett et al., 2017) para la transformación de cascarilla a energía eléctrica y ceniza rica en sílice, es la elegida.

Es posible realizar una estimación del costo de una central termoeléctrica de biomasa de acuerdo con la siguiente ecuación (Gotti, 2018):

$$Costo \cong 3 \text{ M€} + 2 \frac{\text{M€}}{\text{MW}} * P$$

Donde, P es la potencia de la central, para una de 10 MWh, la anterior ecuación daría un costo de 23 M€, tomando el euro a un valor de 3.400 pesos, el costo en moneda corriente colombiana sería de 78.200 millones de pesos. Otros autores reportan un costo de 20 millones de dólares, considerando que un reactor TORBED® puede costar de 1,75 a 2,25 millones de dólares por MWh (Blissett et al., 2017). Teniendo presente los casi 1.150 km que separa el puerto de Cartagena y Yopal, podría hablarse de que el costo para la central termoeléctrica es de 22,5 millones de dólares, valor cercano a 23 M€ propuesto por Gotti (2018), ya que el valor del euro y dólar a la fecha son aproximadamente semejantes.

De acuerdo con la resolución 030 del 2018 de la CREG para generadores de energía el pago sería del 40% del valor del kWh cobrado en la respectiva región,

para el caso de Casanare de 500 pesos; entonces por cada hora de operación de una central termoeléctrica en el Departamento de Casanare, ENERCA pagaría a la empresa operadora de la central 2 millones de pesos por cada hora. La operación típica de una planta de biomasa es 7.000 horas anuales, lo cual daría lugar a la facturación de 14.000 millones de pesos anuales por concepto de operación de energía.

El rendimiento aproximado del sistema TORBED® es de aproximadamente 24%, lo cual da lugar a que se consuma una tonelada de cascarilla por cada MWh producido. Teniendo en cuenta lo anterior y con una operación de 7.000 horas anuales una central termoeléctrica de 10 MWh consumiría 70.000 toneladas de cascarilla que producen 14.000 toneladas de ceniza rica en sílice. El valor en el mercado de la ceniza de cascarilla es 100 dólares/tonelada, que reportan 4.670 millones de pesos anuales. La operación de la planta podría facturar 18.670 millones de pesos al año (Blissett et al., 2017).

Para evaluar la viabilidad de una central termoeléctrica de cascarilla de arroz en el Departamento de Casanare, se considera la nómina de operación de la planta presentada en la Tabla 13, donde se considera un sobre costo en los valores de nómina del 60% por concepto de prestaciones legales y demás.

Tabla 13. Proyección de personal en una hipotética planta de cascarilla.

Ítem	Personal	Sueldo	Cantidad	Valor
1	Gerente	\$ 7.000.000,00	1	\$ 11.200.000,00
2	Secretaria	\$ 1.500.000,00	1	\$ 2.400.000,00
3	Contador	\$ 2.500.000,00	1	\$ 4.000.000,00
4	Mercadeo ventas	\$ 2.500.000,00	1	\$ 4.000.000,00
5	Ingeniero jefe planta	\$ 5.000.000,00	1	\$ 8.000.000,00
6	Ingeniero procesos	\$ 4.000.000,00	2	\$ 12.800.000,00
7	Técnicos mantenimiento control	\$ 2.500.000,00	4	\$ 16.000.000,00
8	HSEQ	\$ 2.500.000,00	1	\$ 4.000.000,00
9	Operarios Planta	\$ 1.500.000,00	3	\$ 7.200.000,00
10	Vigilancia	\$ 2.000.000,00	1	\$ 3.200.000,00
11	Transporte Logística	\$ 2.000.000,00	3	\$ 9.600.000,00
Total, Mes			19	\$ 82.400.000,00
Anual			19	\$ 988.800.000,00

**Fuente:** Elaboración propia



Tabla 14. Balance de flujo de caja para una central termoeléctrica de cascarilla.

<b>Año</b>	<b>Egresos</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Flujo de efectivo</b>
0	Inversión inicial		-\$ 78.200.000.000
1	\$ 7.556.029.280	\$ 18.670.000.000	\$ 11.113.970.720
2	\$ 7.589.841.899	\$ 19.287.977.000	\$ 11.698.135.101
3	\$ 7.624.773.716	\$ 19.926.409.039	\$ 12.301.635.323
4	\$ 7.660.861.776	\$ 20.585.973.178	\$ 12.925.111.402
5	\$ 7.698.144.351	\$ 21.267.368.890	\$ 13.569.224.539
6	\$ 7.736.660.979	\$ 21.971.318.800	\$ 14.234.657.822
7	\$ 7.776.452.507	\$ 22.698.569.453	\$ 14.922.116.945
8	\$ 7.817.561.135	\$ 23.449.892.102	\$ 15.632.330.966
9	\$ 7.860.030.459	\$ 24.226.083.530	\$ 16.366.053.071
10	\$ 7.903.905.517	\$ 25.027.966.895	\$ 17.124.061.378
<b>Total</b>	\$ 77.224.261.619	\$ 217.111.558.886	\$ 139.887.297.267

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Tabla 14 los egresos fueron calculados con el valor de la nómina anual reportada en la Tabla 13, considerando un incremento igual a 3,31% que corresponde a la tasa inflación para el año 2019. Se considero unos costos de operación del 35% de los ingresos anuales, para determinar el flujo de efectivo anual. Se considero un ciclo de 10 años para el proyecto debido a la envergadura de este. Si suponemos una tasa de interés del 10% (Blissett et al., 2017) se encuentra un valor actual neto (VAN) de \$ 4.595.304.083 y una TIR de 11%, lo cual indica que el proyecto sería viable; sin embargo, es necesario una evaluación más profunda, que permita establecer con baja incertidumbre la viabilidad de la central termoeléctrica de cascarilla de arroz en la ciudad de Yopal.

## 9. CONCLUSIONES

Las transformaciones tecnológicas de la cascarilla de arroz es un tema ampliamente estudiado en la literatura científica, dando lugar a importantes productos como energía, biocombustibles, sílice amorfa y otros derivados del silicio. Ha recibido especial interés en los países productores de arroz paddy ya que constituye una quinta parte de este.

Las transformaciones termoquímicas es uno de los principales usos de la cascarilla que demanda inicialmente de una gran inversión de capital, pero a largo plazo es sostenible a nivel ambiental y económico. Muchas de las investigaciones a nivel mundial y nacional se han enfocado precisamente en este tipo de tecnología ya que es posible obtener energía eléctrica durante este proceso.

Las investigaciones muestran que es posible reducir la huella ambiental en la producción de cascarilla, siendo una fuente de energía renovable y de productos de interés industrial.

Para el departamento de Casanare la mejor alternativa de transformación es la combustión mediante tecnología TORBED®, la cual permite obtener energía eléctrica con eficiencias del orden del 24% y ceniza rica en sílice amorfa. Es importante resaltar que otras técnicas de combustión contrario a la tecnología TORBED®, no controlan la temperatura de combustión alcanzando valores donde se genera sílice cristalina, hecho indeseado pues reduce su actividad química.

Una propuesta de central termoeléctrica basada en TORBED® de 10 MWh con operación de 7.000 horas anuales, arroja un TIR de 11% y un VAN \$ 4.595.304.083, bajo la consideración de una tasa de interés en la inversión de 10%; todo lo anterior calculado a 10 años, teniendo en cuenta la inversión (78.200 millones de pesos) y la gran envergadura del proyecto.

## 10.REFERENCIAS

- Abaide, E. R., Mortari, S. R., Ugalde, G., Valério, A., Amorim, S. M., Di Luccio, M., ... Mazutti, M. A. (2019). Subcritical water hydrolysis of rice straw in a semi-continuous mode. *Journal of Cleaner Production*, 209, 386–397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.259>
- Abaide, E. R., Tres, M. V, Zabet, G. L., & Mazutti, M. A. (2019). Reasons for processing of rice coproducts: Reality and expectations. *Biomass and Bioenergy*, 120, 240–256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.032>
- Abaide, E. R., Ugalde, G., Di Luccio, M., Moreira, R. de F. P. M., Tres, M. V, Zabet, G. L., & Mazutti, M. A. (2019). Obtaining fermentable sugars and bioproducts from rice husks by subcritical water hydrolysis in a semi-continuous mode. *Bioresource Technology*, 272, 510–520. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.075>
- Abdelwahab, O., El Nemr, A., El-Sikaily, A., & Khaled, A. (2005). Use of rice husk for adsorption of direct dyes from aqueous solution: A case study of direct F. Scarlet. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 31. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Amany\\_El-Sikaily2/publication/235224152\\_Use\\_of\\_rice\\_husk\\_for\\_adsorption\\_of\\_direct\\_dyes\\_from\\_aqueous\\_solution\\_A\\_case\\_study\\_of\\_direct\\_F\\_Scarlet/links/553fefef0cf29680de9dc187.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Amany_El-Sikaily2/publication/235224152_Use_of_rice_husk_for_adsorption_of_direct_dyes_from_aqueous_solution_A_case_study_of_direct_F_Scarlet/links/553fefef0cf29680de9dc187.pdf)
- Adam, F., Appaturi, J. N., & Iqbal, A. (2012). The utilization of rice husk silica as a catalyst: Review and recent progress. *Catalysis Today*, 190(1), 2–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.04.056>
- Aguilar Sierra, J. M., & Tulcán Álvarez, E. A. (2018). *Estudio del potencial energético de la cascara de arroz ecuatoriano peletizado para su uso como combustible* (Universidad de Guayaquil). Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/33180/1/401-1317> - potencial energetico cascara arroz ecuatoriano.pdf
- Ahmed, K., Nizami, S. S., & Riza, N. Z. (2014). Reinforcement of natural rubber hybrid composites based on marble sludge/Silica and marble sludge/rice husk derived silica. *Journal of Advanced Research*, 5(2), 165–173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.01.008>
- Ahumada, L. M., & Rodríguez-Páez, J. E. (2006). Uso del SiO<sub>2</sub> obtenido de la cascarilla de arroz en la síntesis de silicato de calcio. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 30(117), 581–594.

Recuperado de [http://www.accefyn.com/revista/Vol\\_30/117/581 a 594.pdf](http://www.accefyn.com/revista/Vol_30/117/581_a_594.pdf)

- Álvarez García, L. J., & Ardila Pérez, A. del P. (2011). *La cascarilla de arroz como material de agregado en la producción de prefabricados de mortero secos utilizados en el aligeramiento de losas de concreto* (Universidad Piloto de Colombia). Recuperado de <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/1381/00000178.pdf?sequence=1>
- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2014). Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 128, 162–169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.074>
- Ang, T. N., Ngoh, G. C., & May Chua, A. S. (2013). Comparative study of various pretreatment reagents on rice husk and structural changes assessment of the optimized pretreated rice husk. *Bioresource Technology*, 135, 116–119. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.09.045>
- Apolinar-Hidalgo, F., Honorato-Salazar, J. A., & Colotl-Hernández, G. (2017). Caracterización energética de la madera de *Acacia pennatula* Schltdl. & Cham. y *Trema micrantha* (L.) Blume. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(39), 71–82. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322017000100071&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322017000100071&script=sci_arttext)
- Arellano Díaz, J. (2002). *Introducción a la ingeniería ambiental* (Primera). México: Alfaomega.
- Asprilla, D. B., Valdés, C. F., Macías, R. J., & Chejne, F. (2018). Evaluation of potential of energetic development in isolated zones with wide biodiversity: NIZ Chocó-Colombia case study. *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 109–117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.08.010>
- Avalos-Mezones, A., & Torres-Bazán, I. (2018). *Modelo de negocio para la producción y comercialización de envases biodegradables a base de cascarilla de arroz*. Universidad de Piura.
- Azat, S., Korobeinyk, A. V., Moustakas, K., & Inglezakis, V. J. (2019). Sustainable production of pure silica from rice husk waste in Kazakhstan. *Journal of Cleaner Production*, 217, 352–359. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.142>
- Baird, C., & Cann, M. (2012). *Environmental chemistry*. Macmillan Higher Education.
- Bakar, R. A., Yahya, R., & Gan, S. N. (2016). Production of High Purity Amorphous

- Silica from Rice Husk. *Procedia Chemistry*, 19, 189–195.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.092>
- Bansal, V., Ahmad, A., & Sastry, M. (2006). Fungus-mediated biotransformation of amorphous silica in rice husk to nanocrystalline silica. *Journal of the American Chemical Society*, 128(43), 14059–14066.
- Beg, S., Zafar, S. I., & Shah, F. H. (1986). Rice husk biodegradation by *Pleurotus ostreatus* to produce a ruminant feed. *Agricultural Wastes*, 17(1), 15–21.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0141-4607\(86\)90145-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0141-4607(86)90145-9)
- Beidaghy Dizaji, H., Zeng, T., Hartmann, I., Enke, D., Schliermann, T., Lenz, V., & Bidabadi, M. (2019). Generation of High Quality Biogenic Silica by Combustion of Rice Husk and Rice Straw Combined with Pre- and Post-Treatment Strategies—A Review. *Applied Sciences*, Vol. 9.  
<https://doi.org/10.3390/app9061083>
- Blissett, R., Sommerville, R., Rowson, N., Jones, J., & Laughlin, B. (2017). Valorisation of rice husks using a TORBED® combustion process. *Fuel Processing Technology*, 159, 247–255.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.046>
- Cadena, C. G., & Bula Silvera, A. J. (2002). Estudio de la variación en la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 12(12), 1–9.
- Calero Quezada, F. S., & Vásconez Peñaherrera, L. A. (2012). *Desarrollo experimental de un aislante térmico utilizando cascarilla de arroz y aglutinantes naturales, en planchas rígidas* (SANGOLQUÍ/ESPE/2012). Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/5500/1/T-ESPE-033587.pdf>
- Camargo Pérez, N. R., & Higuera Sandoval, C. H. (2017). Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla del arroz. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(1), 91–109.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1907>
- Candia-García, C., Delgadillo-Mirquez, L., & Hernandez, M. (2018). Biodegradation of rice straw under anaerobic digestion. *Environmental Technology & Innovation*, 10, 215–222.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.02.009>
- Cardona Uribe, N., Arenas Echeverri, C., Batancur, M., Jaramillo, L., & Martínez, J. (2018). Posibilidades de usar la ceniza de cascarilla de arroz como reforzante

- en el sector de polímeros – una revisión. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 127–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018012>
- Cardoso Manique, M., Schmitt Faccini, C., Onorevoli, B., Benvenuti, E. V., & Bastos Caramao, E. (2012). Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil. *Fuel*, 92(1), 56–61. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.07.024>
- Casas Sandoval, L. (2015). *Efecto de la utilización de la cascarilla de arroz y almidón como ligante en la resistencia de paneles aglomerados de uso en la construcción* (Universidad Nacional de Ingeniería). Recuperado de [https://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/3419/1/casas\\_sl.pdf](https://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/3419/1/casas_sl.pdf)
- Castillo, R. A. P., & Julca, M. Á. G. (2018). Aplicación de cascarilla de arroz como fuente de silicio y fertilización mineral del cultivo de limonero (*Citrus aurantifolia*) en suelos de textura arenosa-Piura. *Revista de Investigaciones de la Universidad Le Cordon Bleu*, 5(1), 45–63.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica* (Séptima; M. Á. Toledo Castellanos, Ed.). México: McGraw-Hill Educación.
- Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S.-C., Ryu, C., Jeon, J.-K., Shin, M.-C., & Park, Y.-K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40, 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- Chakraverty, A., Mishra, P., & Banerjee, H. D. (1988). Investigation of combustion of raw and acid-leached rice husk for production of pure amorphous white silica. *Journal of Materials Science*, 23(1), 21–24. <https://doi.org/10.1007/BF01174029>
- Chandrasekhar, S., Pramada, P. N., & Praveen, L. (2005). Effect of organic acid treatment on the properties of rice husk silica. *Journal of Materials Science*, 40(24), 6535–6544. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1816-z>
- Chandrasekhar, S., Satyanarayana, K. G., Pramada, P. N., Raghavan, P., & Gupta, T. N. (2003). Review Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk—an overview. *Journal of Materials Science*, 38(15), 3159–3168. <https://doi.org/10.1023/A:1025157114800>
- Chiang, K.-Y., Liao, C.-K., & Lu, C.-H. (2016). The effects of prepared iron-based catalyst on the energy yield in gasification of rice straw. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(46), 21747–21754. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.021>

- Chumo Zambrano, L. N., & González Velásquez, J. L. (2017). *Ecotableros a base de residuos agroindustriales de cascarilla de arroz y bagazo de caña de azúcar en el cantón Tosagua, Manabí* (Calceta: Espam). Recuperado de <http://190.15.136.145/bitstream/42000/673/1/TMA152.pdf>
- Cieza Orrillo, L. D., & Rivadeneyra Larrain, D. C. (2013). *Formulación de briquetas a base de cascarilla de arroz (oryza sativa) a emplearse como combustible de cocinas ecoregionales, en la región Lambayeque, 2012*. Universidad Señor de Sipán.
- Colciencias, D. A. de C. T. e innovación, & Gobernación del Casanare, D. de C. (2012). *Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación (PEDCTI) de Casanare* (Primera). Bogotá D.C.: Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología - OCyT.
- Colciencias, D. A. de C. T. e innovación, & Gobernación del Casanare, D. de C. (2015). *Plan y acuerdo estratégico departamental de ciencia, tecnología e innovación*. Recuperado de <https://www.colciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/paed-casanare.pdf>
- Contreras, L. M., Schelle, H., Sebrango, C. R., & Pereda, I. (2012). Methane potential and biodegradability of rice straw, rice husk and rice residues from the drying process. *Water science and technology*, 65(6), 1142–1149.
- Cué Brugueras, M., Díaz Alonso, G., Díaz Martínez, A. G., & Valdés Abreu, M. de la C. (2008). El artículo de revisión. *Revista Cubana de Salud Pública*, Vol. 34, p. 0. scielocu.
- Da Costa, H. M., Visconte, L. L. Y., Nunes, R. C. R., & Furtado, C. R. G. (2003). Rice husk ash filled natural rubber. I. Overall rate constant determination for the vulcanization process from rheometric data. *Journal of applied polymer science*, 87(8), 1194–1203. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Helson\\_Da\\_Costa/publication/229858230\\_Rice\\_husk\\_ash\\_filled\\_natural\\_rubber\\_I\\_Overall\\_rate\\_constant\\_determination\\_for\\_the\\_vulcanization\\_process\\_from\\_rheometric\\_data/links/5a3002a8a6fdc\\_cbf7ef12a18/Rice-husk-ash-filled-nat](https://www.researchgate.net/profile/Helson_Da_Costa/publication/229858230_Rice_husk_ash_filled_natural_rubber_I_Overall_rate_constant_determination_for_the_vulcanization_process_from_rheometric_data/links/5a3002a8a6fdc_cbf7ef12a18/Rice-husk-ash-filled-nat)
- DANE, D. administrativo nacional de estadística, & FEDEARROZ, F. nacional de arroceros. (2017a). *4° Censo nacional arrocero* (p. 35). p. 35. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/censo-nacional-arrocero/boletin-tecnico-4to-censo-nacional-arrocero-2016.pdf>
- DANE, D. administrativo nacional de estadística, & FEDEARROZ, F. nacional de

- arroceros. (2017b). *Encuesta nacional de arroz mecanizado*. Recuperado de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol\\_arroz\\_Isem17.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol_arroz_Isem17.pdf)
- DANE, D. administrativo nacional de estadística, & FEDEARROZ, F. nacional de arroceros. (2017c). *IV Censo nacional arrocero 2016*. Recuperado de [http://www.fedearroz.com.co/doc\\_economia/Libro Censo General.pdf](http://www.fedearroz.com.co/doc_economia/Libro Censo General.pdf)
- DANE, D. administrativo nacional de estadística, & FEDEARROZ, F. nacional de arroceros. (2018a). *Encuesta nacional de arroz mecanizado, ENAM*. Recuperado de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol\\_arroz\\_Isem17.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol_arroz_Isem17.pdf)
- DANE, D. administrativo nacional de estadística, & FEDEARROZ, F. nacional de arroceros. (2018b). *Encuesta nacional de arroz mecanizado, ENAM I semestre 2018*. Bogotá D.C.
- DANE, D. administrativo nacional de estadística, & FEDEARROZ, F. nacional de arroceros. (2018c). *Encuesta nacional de arroz mecanizado, ENAM II semestre 2018*. Bogotá D.C.
- Davarpanah, J., & Kiasat, A. R. (2013). Catalytic application of silver nanoparticles immobilized to rice husk-SiO<sub>2</sub>-aminopropylsilane composite as recyclable catalyst in the aqueous reduction of nitroarenes. *Catalysis Communications*, 41, 6–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catcom.2013.06.020>
- Dendy, D. A. V., & Dobraszczyk, B. J. (2004). *Cereales y productos derivados, Química y tecnología*. Ed. Acribia. Zaragoza: Editorial Acribia, S.A.
- Dijkstra, T. W., Duchateau, R., Van Santen, R. A., Meetsma, A., & Yap, G. P. A. (2002). Silsesquioxane models for geminal silica surface silanol sites. A spectroscopic investigation of different types of silanols. *Journal of the American Chemical Society*, 124(33), 9856–9864.
- Doménech, X. (2000). *Química del suelo* (Tercera). Barcelona: Miraguano ediciones.
- Drummond, C., McCann, R., & Patwardhan, S. V. (2014). A feasibility study of the biologically inspired green manufacturing of precipitated silica. *Chemical Engineering Journal*, 244, 483–492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.01.071>
- Engel, T., & Reid, P. (2006). *Química Física* (Primera; M. Martín Romo, Ed.). Madrid:



Pearson educación, S.A.

- Escaño, L., Federico, E., Rivero, M., Barett, L., & Merchand, C. (2011). Guía práctica y estudio de casos Producción más limpia. *Programa Buenos Aires produce más limpio*. pág, 250.
- Estevez, M., Vargas, S., Castaño, V. M., & Rodriguez, R. (2009). Silica nanoparticles produced by worms through a bio-digestion process of rice husk. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355(14), 844–850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2009.04.011>
- FAO, O. de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. (2018). Seguimiento del Mercado del Arroz de la FAO (SMA). Recuperado el 6 de octubre de 2018, de <http://www.fao.org/economic/est/publicaciones/publicaciones-sobre-el-arroz/seguimiento-del-mercado-del-arroz-sma/es/>
- Feng, D., Zhang, Y., Zhao, Y., & Sun, S. (2018). Catalytic effects of ion-exchangeable K<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> on rice husk pyrolysis behavior and its gas–liquid–solid product properties. *Energy*, 152, 166–177. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.03.119>
- Fonseca Cuenca, E. G., & Tierra Tingo, F. L. (2011). *Desarrollo de un Proceso Tecnológico para la Obtención de Briquetas de Aserrín de Madera y Cascarilla de Arroz, y Pruebas de Producción de Gas Pobre*. (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1883>
- Forero Polania, D. F., Peña Beltran, C. E., & Ambiental, I. (2017). Biofiltración De Ácido Acético Usando Como Lecho filtrante compost a partir de Pollinaza-Residuos De Poda- Cascarilla De Arroz. *instname:Universidad Santo Tomás*. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/4315#.XSpGVfiPtlk.mendeley>
- Gadde, B., Bonnet, S., Menke, C., & Garivait, S. (2009). Air pollutant emissions from rice straw open field burning in India, Thailand and the Philippines. *Environmental Pollution*, 157(5), 1554–1558. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.01.004>
- García, F., Lanfranco, B., & Hareau, G. (2012). Efecto sobre el comercio y bienestar de distintas estrategias tecnológicas para el arroz uruguayo. En *Serie técnica* (Vol. 197). Recuperado de [http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos compartidos/18429230712122751.pdf](http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos/compartidos/18429230712122751.pdf)

- Gaurav, N., Sivasankari, S., Kiran, G. S., Ninawe, A., & Selvin, J. (2017). Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 205–214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.070>
- Ghime, D., & Ghosh, P. (2017). Heterogeneous Fenton degradation of oxalic acid by using silica supported iron catalysts prepared from raw rice husk. *Journal of Water Process Engineering*, 19, 156–163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.07.025>
- Ghorbani, F., Sanati, A. M., & Maleki, M. (2015). *Production of Silica Nanoparticles from Rice Husk as Agricultural Waste by Environmental Friendly Technique*. 2(1), 56–65.
- Gnanamanickam, S. S. (2009). *Biological control of rice diseases* (Vol. 8). Springer Science & Business Media.
- Gotti, D. (2018, abril 29). *Centrales termoeléctricas de biomasa: descripción de los principales tipos de caldera* (p. 6). p. 6. Recuperado de [file:///C:/Users/dairo/Downloads/Articulocentrales termoelctricas de biomasa\\_Da videGotti\\_100367626.pdf](file:///C:/Users/dairo/Downloads/Articulocentrales termoelctricas de biomasa_Da videGotti_100367626.pdf)
- Grover, P. ., & Mishra, S. K. (1996). *Biomass briquetting: technology and practices*. Bangkok: FAO, Food and agriculture organization of the united nations.
- Guan, Y., Chen, G., Cheng, Z., Yan, B., & Hou, L. (2017). Air pollutant emissions from straw open burning: A case study in Tianjin. *Atmospheric Environment*, 171, 155–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.020>
- Guarin, A. S., Molina, J. S., & Díaz, J. C. L. (2017). Uso de nutrientes tecnológicos como materia prima en la fabricación de materiales de construcción en el paradigma de la economía circular. *Respuestas*, 22(1), 6–16. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5848293>
- Guirao-Goris, J. A., Olmedo Salas, A., & Ferrer Ferrandis, E. (2008). El artículo de revisión. *Revista iberoamericana de enfermería comunitaria*, 1(1), 1–25.
- Han, P., Ding, D., Xu, Y., Zou, W., Wang, Y., Li, Y., & Zou, L. (2008). Use of rice husk for the adsorption of congo red from aqueous solution in column mode. *Bioresource Technology*, 99(8), 2938–2946. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2007.06.027>
- He, D., Ikeda-Ohno, A., Boland, D. D., & Waite, T. D. (2013). Synthesis and Characterization of Antibacterial Silver Nanoparticle-Impregnated Rice Husks

and Rice Husk Ash. *Environmental Science & Technology*, 47(10), 5276–5284.  
<https://doi.org/10.1021/es303890y>

Hernández, H. E. (2010). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Unidad de Planeación Minero Energética.

Higuera Infante, S. K. (2016). *Evaluación de un sistema de tratamiento que optimice el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del INPEC - Yopal* (Universidad Nacional Abierta y a Distancia). Recuperado de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/8448/3/1117323777.pdf>

Higuera Infante, S. K. (2017). Biofiltro con cascarilla de arroz y pasto vetiver (*C. Zizanioides*) para el tratamiento del efluente de la PTAR del INPEC–Yopal, Casanare, Colombia. *RIAA*, 8(1), 107–118.

Huaripoma Vega, D. A. (2015). *Diseño de un gasificador downdraft invertido de 2600 kcal/h que emplea cascarilla de arroz como combustible* (Pontificia universidad católica del Perú). Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/71405957.pdf>

Jain, A., Balasubramanian, R., & Srinivasan, M. P. (2016). Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review. *Chemical Engineering Journal*, 283, 789–805.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.014>

Khan, T., Ab Whahap, S. A. Bin, & Chaudhuri, M. (2012). Adsorption of arsenite from water by rice husk silica. *Nature Environment and Pollution Technology*, 11, 229–233. Recuperado de [http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-38-9-\(9\)B-1861.pdf](http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-38-9-(9)B-1861.pdf)

Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1–2), 37–40. Recuperado de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547/5543>

Kumar, S., & Dutta, V. (2019). Efficiency of constructed wetland microcosms (CWMs) for the treatment of domestic wastewater using aquatic macrophytes. En *Environmental Biotechnology: For Sustainable Future* (pp. 287–307). Springer.

Leng, L., Yuan, X., Zeng, G., Shao, J., Chen, X., Wu, Z., ... Peng, Z. (2015). Surface characterization of rice husk bio-char produced by liquefaction and application for cationic dye (Malachite green) adsorption. *Fuel*, 155, 77–85.  
<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2015.04.019>

- Li, Ying, Ding, X., Guo, Y., Rong, C., Wang, L., Qu, Y., ... Wang, Z. (2011). A new method of comprehensive utilization of rice husk. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2–3), 2151–2156. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2011.01.013>
- Li, Yue, Chen, Y., & Wu, J. (2019). Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. *Applied Energy*, 240, 120–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>
- Lim, J. S., Abdul Manan, Z., Wan Alwi, S. R., & Hashim, H. (2012). A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3084–3094. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.051>
- Liou, T.-H., & Yang, C.-C. (2011). Synthesis and surface characteristics of nanosilica produced from alkali-extracted rice husk ash. *Materials Science and Engineering: B*, 176(7), 521–529. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.01.007>
- Liu, H., Zhang, L., Han, Z., Xie, B., & Wu, S. (2013). The effects of leaching methods on the combustion characteristics of rice straw. *Biomass and Bioenergy*, 49, 22–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.024>
- Mai Thao, P. T., Kurisu, K. H., & Hanaki, K. (2011). Greenhouse gas emission mitigation potential of rice husks for An Giang province, Vietnam. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3656–3666. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.023>
- Malik, D. S., Jain, C. K., & Yadav, A. K. (2017). Removal of heavy metals from emerging cellulosic low-cost adsorbents: a review. *Applied Water Science*, 7(5), 2113–2136. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0401-8>
- Manique, M. C., Faccini, C. S., Onorevoli, B., Benvenuto, E. V., & Caramão, E. B. (2012). Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil. *Fuel*, 92(1), 56–61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.07.024>
- Markovska, I. G., & Lyubchev, L. A. (2007). A Study on the thermal destruction of rice husk in air and nitrogen atmosphere. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 89(3), 809–814. <https://doi.org/10.1007/s10973-007-8294-2>
- Marrugo, G., Valdés, C. F., & Chejne, F. (2016). Characterization of Colombian Agroindustrial Biomass Residues as Energy Resources. *Energy & Fuels*, 30(10), 8386–8398. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01596>

- Maslin, M. (2008). *Global warming: a very short introduction*. OUP Oxford.
- Masulili, A., Utomo, W. H., & Syechfani, M. S. (2010). Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science*, 2(1), 39.
- Mayorga, E., & Villacrés, D. (2015). Diseño de reactores biológicos para tratamiento de aguas de canales de riego. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 10(1), 30–36. Recuperado de <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/cienciaytecnologia/article/view/25/24>
- McKeen, L. (2006). *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook*, ; William Andrew. Inc.: *Wilmington, DC, USA*.
- Megawati, Sediawan, W. B., Sulisto, H., & Hidayat, M. (2011). Kinetics of sequential reaction of hydrolysis and sugar degradation of rice husk in ethanol production: Effect of catalyst concentration. *Bioresource Technology*, 102(2), 2062–2067. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.09.084>
- Merino-Trujillo, A. (2011). Como escribir documentos científicos (Parte 3). Artículo de revisión. *Salud en Tabasco*, 17(1–2), 36–40.
- Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2012). *Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño* (Primera). México: Alfaomega.
- Montalvo, J., Aurelia, P., Ortiz Dongo, L. F., Maraví, C., Luis, J., Téllez Monzón, L. A., ... Visitación Figueroa, L. (2018). Transformación del nitrógeno durante el compostaje de bosta de caballo. *Producción+ Limpia*, 13(2), 77–88.
- Mor, S., Manchanda, C. K., Kansal, S. K., & Ravindra, K. (2017). Nanosilica extraction from processed agricultural residue using green technology. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1284–1290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.142>
- Mustafa, A. M., Poulsen, T. G., & Sheng, K. (2016). Fungal pretreatment of rice straw with *Pleurotus ostreatus* and *Trichoderma reesei* to enhance methane production under solid-state anaerobic digestion. *Applied Energy*, 180, 661–671. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.135>
- Muthayya, S., Sugimoto, J. D., Montgomery, S., & Maberly, G. F. (2014). An overview of global rice production, supply, trade, and consumption. *Annals of the new york Academy of Sciences*, 1324(1), 7–14.

- Nzihou, A., Stanmore, B., Lyczko, N., & Minh, D. P. (2019). The catalytic effect of inherent and adsorbed metals on the fast/flash pyrolysis of biomass: A review. *Energy*, 170, 326–337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.174>
- Otoko, G. R. (2014). A review of the stabilization of problematic soils. *International Journal of Engineering and Technology Research*, 2(5), 1–6.
- Patel, M., Karera, A., & Prasanna, P. (1987). Effect of thermal and chemical treatments on carbon and silica contents in rice husk. *Journal of Materials Science*, 22(7), 2457–2464.
- Pedro Simón, F. (1892). *Noticias historiales de las conquistas de tierra firme en las indias occidentales -Partes 2 y 3* (Primera). Bogotá: Casa editorial de Medardo Rivas.
- Peña, C. E., Carte, D. E., & Ayala Fierro, F. (2001). *Toxicología ambiental: evaluación de riesgos y restauración ambiental*. Recuperado de <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>
- Piñeros-Castro, Y., Velasco, G. A., Proaños, J., Cortes, W., & Ballesteros, I. (2011). Producción de azúcares fermentables por hidrólisis enzimática de cascarilla de arroz pretratada mediante explosión con vapor. *REVISTA ION; Vol. 24 Núm. 2* (2011): *Revista ION*.
- Pita-Morales, L. A. (2016). Línea de tiempo: educación ambiental en Colombia. *Revista Praxis*, 12, 118–125. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21676/23897856.1853>
- Pode, R. (2016). Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1468–1485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.051>
- Pongdong, W., Kummerlöwe, C., Vennemann, N., Thitithammawong, A., & Nakason, C. (2016). Property correlations for dynamically cured rice husk ash filled epoxidized natural rubber/thermoplastic polyurethane blends: Influences of RHA loading. *Polymer Testing*, 53, 245–256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.05.026>
- Prasara-A, J., & Gheewala, S. H. (2017). Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1020–1028. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.042>
- Prieto Núñez, A. E. (2019). *Implementación y evaluación de dos filtros de cascarilla*

de arroz y luffa para el tratamiento de agua de escorrentía de techo del Edificio I de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito). Recuperado de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/963>

Quiceno Villada, D., & Mosquera Gutierrez, M. Y. (2010). *Alternativas Tecnológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible*. Universidad Autónoma de Occidente.

Quispe, I., Navia, R., & Kahhat, R. (2017). Energy potential from rice husk through direct combustion and fast pyrolysis: A review. *Waste Management*, 59, 200–210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.001>

Reif Acherman, S., Blanco Silva, L., & Arbóleda Villanueva, L. (2010). El hidrociclón como una alternativa para la recuperación parcial de ayudas filtrantes en el proceso de refinación de azúcar. *Dyna*, 77(164), 292–300. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25599/26070>

Restrepo Gallego, M. (2006). Producción más Limpia en la Industria Alimentaria. *Producción + Limpia*, 1(1), 87–101. Recuperado de [http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/217/1/PL\\_V1\\_N1\\_87\\_PL\\_INDUSTRIA\\_ALIMENTARIA.pdf](http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/217/1/PL_V1_N1_87_PL_INDUSTRIA_ALIMENTARIA.pdf)

Retto Hernández, P. I. (2019). *Potencial energético de la producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales*. Universidad Nacional de Trujillo.

Rocha, C. C., Morozin Zaia, D. A., da Silva Alfaya, R. V., & da Silva Alfaya, A. A. (2009). Use of rice straw as biosorbent for removal of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Hg(II) ions in industrial effluents. *Journal of Hazardous Materials*, 166(1), 383–388. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2008.11.074>

Rodríguez Baracaldo, R., Benito, J. A., & Cabrera, J. M. (2010). Cobre nanocristalino y ultrafino obtenido por molienda mecánica. *Ingeniería e investigación*, 30(1), 141–145.

Rodríguez, G., Zafra, A., & Balda, R. (2004). Diseño de una unidad piloto compacta para la remoción de metales pesados (Zn, Ni, Cu) presentes en aguas residuales industriales, empleando humedales subsuperficiales con tres especies de vegetación. *Seminario Internacional “Gestión Integral de Servicios Relacionados con el Agua en Saneamientos Nucleados”*. Universidad del Valle. Instituto CINARA.

Rodríguez Salcedo, J., González Salcedo, L. O., Rojas González, A. F., & Palacios Peñaranda, J. A. (2013). *Energía y ambiente* (Primera; J. Rodríguez Salcedo,

Ed.). Santiago de Cali: Universidad Nacional de Colombia.

- Rohatgi, K., Prasad, S. V., & Rohatgi, P. K. (1987). Release of silica-rich particles from rice husk by microbial fermentation. *Journal of Materials Science Letters*, 6(7), 829–831. <https://doi.org/10.1007/BF01729027>
- Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of Environmental Management*, 112, 429–448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>
- Sailema Sánchez, S. A. (2017). *Análisis de la cascarilla de arroz utilizada como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de lavadoras y lubricadoras de autos “Polito’s” ubicada en el cantón Tisaleo de la provincia de Tungurahua* (Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ...). Recuperado de [http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/27810/1/Tesis\\_1241 - Sánchez Sailema Andrés Santiago.pdf](http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/27810/1/Tesis_1241_Sánchez_Sailema_Andrés_Santiago.pdf)
- Santosa, S., Priosambodo, D., & Santosa, R. A. P. (2019). *Physical structure of growing media, seed germination, and growth of Pometia pinnata Forst seedlings*. 030003. <https://doi.org/10.1063/1.5115607>
- Serrano, T., Borrachero, M. V., Monzó, J. M., & Payà, J. (2012). Morteros aligerados con cascarilla de arroz: diseño de mezclas y evaluación de propiedades. *Dyna*, 79(175), 128–136. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/28275/35528>
- Sharifzadeh, M., Sadeqzadeh, M., Guo, M., Borhani, T. N., Murthy Konda, N. V. S. N., Garcia, M. C., ... Shah, N. (2019). The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 71, 1–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.006>
- Sierra Aguilar, J. (2009). *Alternativas de aprovechamiento de las cascarilla de arroz en Colombia*. Universidad de Sucre.
- Sobhanardakani, S., Parvizimosaed, H., & Olyaie, E. (2013). Heavy metals removal from wastewaters using organic solid waste—rice husk. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(8), 5265–5271. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1516-1>
- Soltani, N., Bahrami, A., Pech-Canul, M. I., & González, L. A. (2015). Review on the



- physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials. *Chemical Engineering Journal*, 264, 899–935.
- Srivastava, V. C., Mall, I. D., & Mishra, I. M. (2007). Adsorption thermodynamics and isosteric heat of adsorption of toxic metal ions onto bagasse fly ash (BFA) and rice husk ash (RHA). *Chemical Engineering Journal*, 132(1–3), 267–278. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2007.01.007>
- Suárez, A., Mesa, P., Bravo, V., & Prieto, A. (2015). Evaluación de un sistema de filtros de cascarilla de arroz y luffa cylindrica para el tratamiento de aguas lluvias. *Revista Mutis*, 5(1), 21–27.
- Swamy, V., Saxena, S. K., Sundman, B., & Zhang, J. (1994). A thermodynamic assessment of silica phase diagram. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B6), 11787–11794.
- Triana, J. C. (1984). *Etimologías grecolatinas del español*. Recuperado de <http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1020115196/1020115196.PDF>
- Triana Novoa, M. del P. (2010). *Química ambiental*. Bogotá, D.C.- Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Unrean, P., Lai Fui, B. C., Rianawati, E., & Acda, M. (2018). Comparative techno-economic assessment and environmental impacts of rice husk-to-fuel conversion technologies. *Energy*, 151, 581–593. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.03.112>
- van Hoof, B., & Herrera, C. M. (2007). La evolución y el futuro de la producción más limpia en Colombia . *Revista de Ingeniería* , pp. 101–120. scieloco .
- Vargas, S., Rodriquez, J. R., Lobland, H. E. H., Piechowicz, K., & Brostow, W. (2014). Preparation of Rice Husk-Based Medium Density Fiberboards: Effects of pH Modification on Mechanical and Tribological Performance. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(7), 807–813.
- Vega-Marcote, P., & Álvarez-Suárez, P. (2005). Planteamiento de un marco teórico de la Educación Ambiental para un desarrollo sostenible. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencaís*, 4(1), 17.
- Wade, L. G. J. (2011). *Química orgánica. Volumen 2* (Séptima; G. López Ballesteros, Ed.). México: Pearson Educación.
- Wood, I. P., Cao, H.-G., Tran, L., Cook, N., Ryden, P., Wilson, D. R., ... Waldron, K. W. (2016). Comparison of saccharification and fermentation of steam exploded

rice straw and rice husk. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), 193.  
<https://doi.org/10.1186/s13068-016-0599-6>

Xiong, L., Saito, K., Sekiya, E. H., Sujaridworakun, P., & Wada, S. (2009). Influence of Impurity Ions on Rice Husk Combustion. *Journal of metals, materials and minerals*, 19(2), 73–77. Recuperado de <http://www.ojs.materialsconnex.com/index.php/jmmm/article/view/239>

Xiong, Liangming, Saito, K., Sekita, E., Sujaridworaun, P., & Wada, S. (2009). Influence of Impurity Ions on Rice Husk Combustion. *Metals, Materials and Minerals*, 19(2), 73–77.

Xiong, Liangming, Seia, E. H., Sujaridworaun, P., Wada, S., & Saito, K. (2009). Burning Temperature Dependence of Rice Husk Ashes in Structure and Property. *Metals, Materials and Minerals*, 19(2), 95–99.

Xiong, Liangming, Sekiya, E. H., Wada, S., & Saito, K. (2009). Facile Catalytic Combustion of Rice Husk and Burning Temperature Dependence of the Ashes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 1(11), 2509–2518.  
<https://doi.org/10.1021/am9004623>

Zhang, H., Ding, X., Chen, X., Ma, Y., Wang, Z., & Zhao, X. (2015). A new method of utilizing rice husk: Consecutively preparing d-xylose, organosolv lignin, ethanol and amorphous superfine silica. *Journal of Hazardous Materials*, 291, 65–73. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2015.03.003>

Zhaosheng, Y., Xiaoqian, M., & Ao, L. (2008). Kinetic studies on catalytic combustion of rice and wheat straw under air- and oxygen-enriched atmospheres, by using thermogravimetric analysis. *Biomass and Bioenergy*, 32(11), 1046–1055.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.02.001>